LA GESTIÓN DE LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUIFEROS EN EL MARCO DEL DESARROLLO SOSTENIBLE

DESARROLLO TECNOLÓGICO

Coordinador: Enrique Fernández Escalante

Serie HIDROGEOLOGIA HOY

6

Serie *Hidrogeología hoy*. Título 6

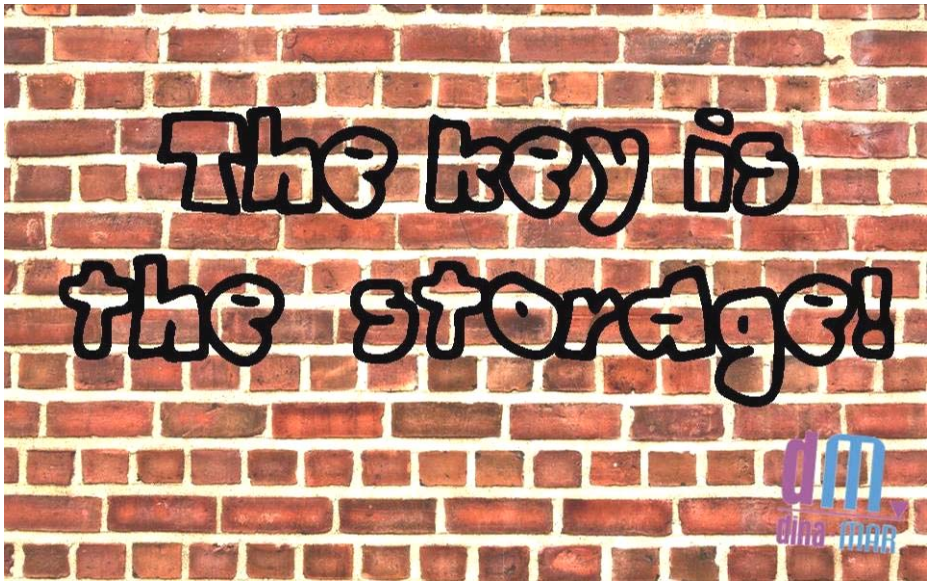
DINA-MAR

Depth Investigation of New Activities for Managed Aquifer Recharge

LA GESTIÓN DE LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS EN EL MARCO DEL DESARROLLO SOSTENIBLE

DESARROLLO TECNOLÓGICO

Octubre de 2010



"La clave es el almacenamiento"
DINA-MAR. UNESCO-MAR Working Group, IGS-TH 2009

Coordinador: Enrique Fernández Escalante

Revisado por los doctores:

Fermín Villarroya Gil (Universidad Complutense de Madrid)

Agustín Pieren Pidal (Universidad Complutense de Madrid)

Serie: *Hidrogeología hoy*
Coord.: A. Enrique Fernández Escalante, 2010.
Título 6: DINA-MAR. La gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible. Desarrollo tecnológico.

Autores: Equipo investigador del proyecto de I+D+i DINA-MAR
Edita e imprime: GRAFINAT. C/ Albasanz, 14 B. 28.037, Madrid.
http://www.metodografico.com/shg.htm / metodografico@metodografico.com
Tf. 91 3045332. Fax: 91 3271031
ISBN: 978-84-614-5123-4
Depósito legal: M-49308-2010

Queda prohibida la reproducción en cualquier tipo de soporte o medio de la parte registrada. Reservados todos los derechos ©.

PRESENTACIÓN

Presentamos el sexto título de la serie *Hidrogeología hoy*, planteado, en esta ocasión, para el proceso de Difusión y Transferencia de Tecnología (DyTT) de los resultados del proyecto de investigación DINA-MAR *(Depth Investigation of New Activities for Managed Aquifer Recharge)* o "La gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible, desarrollo tecnológico", promovido y desarrollado en el Grupo Tragsa durante el último cuatrienio.

El libro se presenta como una "Addenda" técnica a la memoria de cierre del proyecto, y recopila, por un lado, las distintas aportaciones de los técnicos que han intervenido a lo largo de su andadura, y por otro, aportaciones conjuntas emanadas del trabajo en equipo.

Como rasgo principal del proyecto, cabe anticipar su carácter altamente pluridisciplinar, al haber involucrado a técnicos e investigadores de más de ocho titulaciones, además de los colaboradores externos y asesores de la empresa y universidad. De este modo, las aportaciones no profundizan exclusivamente en cuestiones hidrogeológicas, tónica habitual en gran parte de los proyectos de I+D+i relacionados con la gestión de la recarga de acuíferos, o mejor su acrónimo en inglés (MAR). Más bien se extienden hacia varias disciplinas (agronomía, ingeniería de montes, arquitectura, ambientalismo, limnología, geografía, teledetección, etc.), estudiando las posibilidades de interconexión cuando es viable. Este hecho ha resultado especialmente enriquecedor, con varias aportaciones al estado del arte en las distintas temáticas abordadas, que el lector interesado tendrá ocasión de comprobar y valorar.

El equipo investigador quiere dejar constancia expresa de su agradecimiento al Grupo Tragsa y a la Sociedad Española de Participaciones Industriales (SEPI) como su accionista principal, por haber posibilitado y financiado la mayor parte del proyecto, así como a colaboradores externos que han participado en sus distintas etapas, tales como la Plataforma Tecnológica Española del Agua a través de sus grupos de trabajo 2, 3 y 10, la Universidad Complutense de Madrid, la Universidad Alfonso X El Sabio, el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Aguas de Barcelona (AGBAR), etc.

Por último, queremos expresar nuestro deseo de que este volumen esté a la altura de las circunstancias que marca el contexto actual en materia de aguas, y proporcione pautas de planificación y gestión que ayuden a incorporar cada vez más nodos de gestión de la recarga en los esquemas topológicos de la gestión hídrica integral. Esperamos y deseamos una buena acogida por parte de la comunidad científica.

Enrique Fernández Escalante, Coordinador del proyecto.
Noviembre de 2010

EQUIPO DE TRABAJO

Personal	Titulación	Función
Fernández Escalante, A. Enrique	Dr. Cc. Geológicas	Coordinador. Trabajo técnico I+D+i
García Asensio, J. María	Dr. Ingeniero Agrónomo y ambientólogo	Indicadores. MAR en el desarrollo rural
López Hernández, Manuel	Dr. Ingeniero Agrónomo	Divulgación
San Sebastián Sauto, Jon	Dr. Cc. Biológicas	Trabajo técnico I+D+i
Sánchez Serrano, Fernando	Dr. Cc Geológicas	Geoportal
Alcover Lago, Miguel Ángel	Informático	Apoyo teledetección
Briones García, Pedro	Lic. en Geografía	Apoyo GIS
Calero Gil, Rodrigo	DEA Ing. Agrónomo	Apoyo técnico
Castaños Jover, Francisco Javier	Ingeniero de Montes	Teledetección
Cilleros Fuentetaja, Iván	Ing. Tecn. Agrícola	Asistencia técnica televolcado datos
Copano González de Heredia, Carlos	Ingeniero de Montes	Trabajo técnico I+D+i
Delgado Sánchez, Juan Carlos	Ingeniero de Montes	Técnicas de gestión forestal
Fernández González, Raúl	Ing. Tecn. Agrícola	Instalación estaciones DINA-MAR ZNS
García Robles, Laura	Ingeniero Agrónomo	Trabajo de campo
Gómez Martín, Francisco	Analista	Diseño página Web
Izquierdo Pérez, Pablo	Ingeniero Agrónomo	Caudales ambientales
Martínez Tejero, Óscar	Ingeniero Agrónomo	Datos de campo. Trabajo técnico I+D+i
Mayordomo Ramos, Héctor	Lic. Cc Biológicas	Limnología
Minaya Ovejero, Mª Jesús	Lic. Cc Geológicas	Trabajo técnico I+D+i
Moreno Toro, Oskar	Ing. Tecn. Agrícola	Instalación estaciones DINA-MAR ZNS
Prieto Leache, Ignacio	Arquitecto	Hidrogeología urbana
Ruiz Tellez, Carlos	Lic. Cc Geológicas	Trabajo técnico I+D+i
San Miguel Fraile, Mª Ángeles	Lic. Cc Geológicas	Análisis GIS, cartografías
Sánchez Sánchez, Paz	Ing. Tecn. Agrícola	Ensayos infiltración
Senent del Álamo, Miriam W.	Dipl. Ing. geólogo	Hidrogeología
Solar Redón, Ana	Ingeniero Agrónomo	Ensayos infiltración
Valdés Mora, Irene	Ingeniero Agrónomo	Ensayos de campo

ÍNDICE

PRESENTACIÓN 5
EQUIPO DE TRABAJO 6
PRÓLOGO 31
INTRODUCCIÓN 33
OBJETIVOS Y PRETENSIONES DE DINA-MAR 35
Objetivos genéricos del proyecto 35
Objetivos específicos del proyecto 35

CAPÍTULO 1. CONTEXTUALIZACIÓN 39
MARCO LEGAL 39

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE Y NUEVAS APORTACIONES 43

INVENTARIO ACTUALIZADO DE EXPERIENCIAS DE GESTIÓN DE LA RECARGA EN ESPAÑA. Por Enrique Fernández Escalante, Mª Jesús Minaya Ovejero y Miriam W. Senent del Álamo. 43
INTRODUCCIÓN 43
ANTECEDENTES Y EXPERIENCIAS PREVIAS 43
La Rioja 43
RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO ALUVIAL DEL RÍO OJA 43
Castilla y León 44
RECARGA ARTIFICIAL EN EL VALLE DEL ESGUEVA, VALLADOLID 44
Islas Baleares 45
RECARGA ARTIFICIAL EN EL LLANO DE PALMA, EN LA ISLA DE MALLORCA 45
Comunidad Valenciana 45
RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO DE JAVEA, ALICANTE 45
Andalucía 48
RECARGA ARTIFICIAL EN ALCALÁ LA REAL, JAÉN 48
RECARGA ARTIFICIAL EN MANCHA EL REAL, JAÉN 48
DEPURACIÓN EN LAS DEHESAS DE GUADIX, GRANADA 49
RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO DE GRACIA-MORENITA, JAÉN 51
RECARGA ARTIFICIAL CON AGUA DE DRENAJE DE LA MINA DE HIERRO DE ALQUIFE, GRANADA 51
RECARGA ARTIFICIAL REALIZADA EN EL ACUÍFERO ALUVIAL DEL RÍO GUADALQUIVIR (CANAL BAJO) 55
EXPERIENCIA DE RECARGA ARTIFICIAL REALIZADA EN LAS "CALCARENITAS DE CARMONA", SEVILLA 57
RECARGA ARTIFICIAL EN LEBRIJA Y EL CUERVO EN EL ALUVIAL DEL GUADALQUIVIR 59
DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN MAZAGÓN, HUELVA 61
DISPOSITIVOS DE RECARGA ARTIFICIAL ACTUALES 63
Aragón 63
PRESA DE MULARROYA, AZUD DE DERIVACIÓN Y CONDUCCIÓN DE TRASVASE. INDUCCIÓN DE RECARGA ARTIFICIAL 63
RECARGA ARTIFICIAL EN EL CAMPO CARIÑENA 65

Cataluña 66
RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS EN BARCELONA 66
RECARGA ARTIFICIAL REALIZADA EN EL VALLE BAJO Y DELTA DEL LLOBREGAT 67
BARRERA HIDRÁULICA ANTE LA INTRUSIÓN MARINA 71
RECARGA ARTIFICIAL EN LA CUBETA DE SANT ANDREU 72
RECARGA ARTIFICIAL EN EL ALUVIAL DEL BESÓS 74
GESTIÓN DEL AGUA REGENERADA EN LA COSTA BRAVA Y RECARGA ARTIFICIAL EN BLANES. 74
Islas Baleares 76
RECARGA ARTIFICIAL EN S´ESTREMERA, MALLORCA 76
RECARGA ARTIFICIAL EN ARTÁ, MALLORCA 76
PROYECTO DE RECARGA ARTIFICIAL EN CRESTATX, MALLORCA 77
Castilla y León 79
RECARGA ARTIFICIAL EN LA CUBETA DE SANTIUSTE 79
RECARGA ARTIFICIAL EN LA COMARCA DE CARRACILLO 84
RECARGA ARTIFICIAL EN ALCAZARÉN, VALLADOLID 85
Comunidad de Madrid 85
RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO DETRÍTICO TERCIARIO DE MADRID 85
Comunidad Valenciana 88
RECARGA ARTIFICIAL DE LOS EXCEDENTES INVERNALES DEL RÍO BELCAIRE EN CASTELLÓN 88
RECARGA ARTIFICIAL EN EL RÍO MIJARES, CASTELLÓN 90
RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO DE PLANA DE GANDIA-DENIA, SECTOR VERGEL-ELS POBLETS, ALICANTE 90
RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO DE ORBA, ALICANTE 93
RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO DE JIJONA, ALICANTE 96
RECARGA ARTIFICIAL EN MURLA, ALICANTE 97
RECARGA ARTIFICIAL EN AGOST, ALICANTE 97
RECARGA ARTIFICIAL EN TORREMANZANAS, ALICANTE 98
Comunidad de Murcia 98
experiencia de GENERACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA RECARGA ARTIFICIAL EN TOTANA, MURCIA 98
Castilla La Mancha 99
RECARGA ARTIFICIAL EN EL CANAL DEL GUADIANA, CIUDAD REAL 99
Andalucía 100
CAREOS DE LAS ALPUJARRAS 100
GESTIÓN DE LA RECARGA EN LA EXPLOTACIÓN MINERA DE COBRE LAS CRUCES (SEVILLA) 111
LA INSTALACIÓN PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL DE “LOS SOTILLOS” (CÁDIZ) 122
RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO DE EL SEÑORÍO, MARBELLA 124
CONCLUSIONES 125
BIBLIOGRAFÍA 127

INVENTARIO DE TIPOLOGÍAS DE DISPOSITIVOS DE GESTIÓN DE LA RECARGA A NIVEL INTERNACIONAL. APORTACIONES AL ESTADO DEL ARTE Y NUEVAS PROPUESTAS. Por Enrique Fernández Escalante, Mª Jesús Minaya Ovejero y Miriam W. Senent del Álamo. 131

INTRODUCCIÓN 131
OBJETIVOS 132
MATERIALES Y METODOS 132
DESCRIPCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS 133
DISPERSIÓN (1 a 5) 137
1- Balsas de infiltración 137
CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE BALSAS DE INFILTRACIÓN. EJEMPLOS PRÁCTICOS. RECARGA ARTIFICIAL REALIZADA EN LA COMARCA DEL CARRACILLO, SEGOVIA. 141
2- Canales y Zanjas de infiltración 145
EJEMPLOS DE DISEÑOS CONSTRUCTIVOS DE ALGUNOS CANALES. RECARGA ARTIFICIAL REALIZADA EN LA CUBETA DE SANTIUSTE, SEGOVIA 150
Zanjas de infiltración 152
CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE ZANJAS DE INFILTRACIÓN 152
3- Técnicas de tratamiento suelo/acuífero 156
4- Campos de infiltración (inundación y difusión controlada) 160
5- Recarga accidental por retornos de riego 165
MODIFICACIÓN DEL CANAL (6-11) 169
6- Diques de retención y Represas 170
Diques Y presas de retención 171
Represas 171
7- Diques permeables / Presas de arena 173
DIQUES PERMEABLES 173
PRESAS DE ARENA 174
algunos criterios Y EJEMPLOS constructivos para DIQUES Y represas 176
8- Serpenteos *y levees* 181
EJEMPLO DE SERPENTEOS EN EL CAUCE. EL CASO DEL RÍO SANTA ANA, ORANGE COUNTY, CALIFORNIA, (EEUU) 183
9- Escarificación del lecho del río 185
EJEMPLOS DE ESCARIFICACIÓN DE LECHOS DE RÍOS 186
10- Diques subsuperficiales/subterráneos 189
11- Diques perforados 191
POZOS (12-18) 194
12- Qanats (galerías subterráneas) 194
13- Pozos abiertos de infiltración 199
14- Pozos profundos y minisondeos 201
EJEMPLOS DE DISEÑOS CONSTRUCTIVOS DE POZOS DE RECARGA ARTIFICIAL. BATERÍA DEL CANAL DEL GUADIANA, CIUDAD REAL 202
15- Sondeos 205
EJEMPLOS DE DISEÑOS CONSTRUCTIVOS DE SONDEOS Y DISPOSITIVOS MAR TIPO ASR. 206
16- Dolinas, colapsos 208
17/18- ASR/ASTR 210
EJEMPLOS DE DISEÑOS CONSTRUCTIVOS DE SONDEOS Y DISPOSITIVOS MAR TIPO ASR. 215
FILTRACIÓN (19-21) 220
19- Bancos filtrantes en lechos de ríos (RBF) 220
20- Filtración interdunar 224
21- Riego subterráneo 226

LLUVIA (22) 228
22- Captación de agua de lluvia 228
SUDS (23-24) 233
23- Recarga artificial accidental desde conducciones y alcantarillado 233
24- Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible 235
CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 240
ANEXO 1. PANEL RESUMEN 241
ANEXO 2. CONDICIONANTES DE CADA DISPOSITIVO: ES DESEABLE, PROS, PROBLEMAS GENERADOS Y ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES. 243
BIBLIOGRAFÍA 251

CAPÍTULO 3. GESTIÓN FORESTAL Y AGUA 254

RECARGA ARTIFICIAL EN ZONAS DE CABECERA DE CUENCA Y ÁREAS FORESTALES: TÉCNICAS DE GESTIÓN FORESTAL PARA LA PRODUCCIÓN DE AGUA. EJEMPLO EN LA COMUNIDAD VALENCIANA. Por Juan Carlos Delgado Sánchez. 254
ANTECEDENTES 254
MANEJO DEL AGUA DE ESCORRENTÍA 254
Charca y depósito regulador de la sierra del Maigmó (Petrer) 254
El manejo de aguas turbias en el sudeste español 255
LA GESTIÓN FORESTAL 255
Control de cárcavas y de aguas de arroyada 255
Restauración de abancalamientos 255
Selvicultura para la producción de agua 255
MONTES ORDENADOS PARA LA GESTIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS 256
DIQUES FORESTALES PARA LA GESTIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS 256
DISEÑO DE PROYECTOS DE MANEJO DE AGUA DE ESCORRENTÍA PARA SU USO COMO AGUA POTABLE O PARA RIEGO 256

TÉCNICAS PALIATIVAS DE GESTIÓN HÍDRICA. EL INCREMENTO DE LA RESERVA MEDIANTE LA GESTIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN ÁREAS FORESTALES. Por Carlos Copano González De Heredia, Enrique Fernández Escalante y Mª Jesús Minaya Ovejero. 257
INTRODUCCIÓN 257
MATERIALES Y MÉTODOS 257
RESULTADOS Y DISCUSIÓN 258
Repoblaciones y selvicultura para la recarga artificial en profundidad 258
Preparación mecanizada del suelo para favorecer la infiltración 259
Montes ordenados para la recarga de acuíferos 259
Restauración y mantenimiento de bancales 259
Aprovechamiento de las aguas de escorrentía 260
Recogida de agua por impermeabilización de superficies 262
Pequeñas presas en cauces fluviales, a modo de pequeños embalses 262
Balsas de recogida de agua a pie de ladera 263
Boqueras 263
Atochadas 263
CONCLUSIONES 263

BIBLIOGRAFÍA 267

CAPÍTULO 4. MEDIO AMBIENTE Y MAR 268

DIMENSIÓN MEDIOAMBIENTAL DE LA TÉCNICA MAR. EFECTOS, CONDICIONANTES E INDICADORES AMBIENTALES DE LA RECARGA ARTIFICIAL. Por Jon San Sebastián Sauto y José Mª García Asensio. 268

RESUMEN 268
INTRODUCCIÓN 268
OBJETIVOS 268
MATERIALES Y FUENTES DE INFORMACIÓN 269
METODOLOGÍA 269
ACCIONES Y EFECTOS DE LA TÉCNICA MAR 270
Factores del medio 270
Acciones por fases 270
Efectos por método 271
RESULTADOS Y COMENTARIO 271
División administrativa 271
EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) 272
División hidrológica 272
División hidrogeológica 273
División botánica 274
División zoológica 274
División ecológica 275
División por usos 275
Aplicación al CORINE 276
INDICADORES ESPECÍFICOS PARA LA GESTIÓN DE LA REGARGA 280
Definición de indicador ambiental 280
Criterios de selección 280
Mecanismo de la información 281
INDICADORES DE ESTADO 282
INDICADORES DE PRESIÓN 283
INDICADORES DE RESPUESTA 283
CONCLUSIONES 284
BIBLIOGRAFÍA 289

CRITERIOS PARA EL ESTABLECIMIENTO DE CAUDALES ECOLÓGICOS EN LOS CAUCES DE TOMA. Por Óscar Martínez Tejero. 291

INTRODUCCIÓN 291
CLASIFICACIONES Y MÉTODOS GENERALES 291
Métodos de uso común en España: método de simulación de hábitat y método hidrológico 293
Consideraciones hidrogeológicas 297
Consideraciones finales 297

CAUDALES AMBIENTALES. CONSIDERACIONES LOCALES PARA LOS CASOS DEL CARRACILLO Y CUBETA DE SANTIUSTE. Por Óscar Martínez Tejero 299

LA EXPERIENCIA DE LA COMARCA DEL CARRACILLO 299
LA CUBETA DE SANTIUSTE DE SAN JUAN BAUTISTA 301
BIBLIOGRAFÍA 302

CAPÍTULO 5. GEOGRAFÍA, SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, CARTOGRAFIA Y TELEDETECCIÓN 303

GESTIÓN DE LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS. PROCESOS DEDUCTIVOS CON APOYO DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO (SIG). DEFINICIÓN DE LAS "ZONAS MAR" EN LA GEOGRAFÍA ESPAÑOLA Y EL HIDROGEOPORTAL DINA-MAR. Por Mª Ángeles San Miguel Fraile y Fernando Sánchez Serrano. 303

DEFINICIÓN DEL ÁMBITO DE ESTUDIO..... 303
ZONAS DE INFLUENCIA EN TORNO A LA RED HIDROGRÁFICA..... 303
REDUCCIÓN O REAJUSTE DE LAS "ZONAS MAR" O ZONAS DE RECARGA..... 304
PROCESO DE ANÁLISIS. TEMAS CONSIDERADOS..... 305
1- Afloramientos permeables (Mapa litoestratigráfico y de permeabilidad de España, Ministerios de Educación y Medio Ambiente, 2006). 306
2- Geología de España (Mapa litoestratigráfico y de permeabilidad de España, Ministerios de Educación y Medio Ambiente, 2006) 306
3- Red de control de nitratos en las aguas subterráneas (Ministerio de Medio Ambiente, 2000)..... 307
4- Zonas declaradas vulnerables en 2005 (Tragsatec, 2005) 307
5- Regadíos del Plan Nacional de Regadíos (Plan de Vigilancia Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente, 2003)..... 308
6- Polígonos concéntricos distantes hasta 2 kilómetros de los embalses (Tragsatec, 2008) 308
7- Polígonos concéntricos distantes de 1 a 5 kilómetros de los ríos (Tragsatec, 2008) .. 309
8- Riesgo de inundación (Tragsatec, 2007) 309
9- Pendiente (Tragsatec, 2007)..... 310
10- Áreas distantes hasta un kilómetro de los humedales (Tragsatec, 2007)..... 310
11- Áreas distantes hasta un kilómetro del trasvase Tajo-Segura (Tragsatec, 2007)..... 310
12- Calidad de las aguas. Conductividad. (Tragsatec, 2007)..... 310
13- Zonas de influencia de minas en acuíferos. (Tragsatec, 2007)..... 311
14- Usos del suelo según CORINE. (IGN, Ministerio de Fomento, 2000)..... 311
15- Naturalidad del territorio según CORINE. (IGN, Ministerio de Fomento, 2000) 311
16- Buffer de las áreas urbanas detalladas. (TRAGSATEC, 2009)..... 312
17- Piezometría superficial (IGME 2009) 313
18- Piezometría profunda 2008. (IGME 2009)..... 313
19- Masas forestales a escala 1:50.000. (Mapa Forestal de España 1:50.000, Ministerio de Medio Ambiente)..... 313
20- Unidades Hidrológicas susceptibles de recarga artificial según el IGME 314
21- *Buffer* de estaciones depuradoras y habitantes equivalentes. (TRAGSATEC, 2009) 314
22- *Buffer* de estaciones depuradoras por lagunaje. (TRAGSATEC, 2009)..... 314
23- *Buffer* de puntos de control de intrusión marina. (TRAGSATEC, 2009)..... 314
24- Distancia a costa. (Tragsatec, 2009)..... 314
25- Rango altitudinal. Tragsatec, 2009)..... 315
26- Zonas áridas. TRAGSATEC, 2009)..... 315
27- Estaciones meteorológicas de zonas o subcuencas con excedentes hídricos..... 315
28- Sistemas dunares según CORINE. (IGN, Ministerio de Fomento, 2000) 316
PROCESO DE ANÁLISIS. UNIÓN DE TODOS LOS TEMAS Y ASIGNACIÓN DE LOS MÉTODOS DE RECARGA ARTIFICIAL 316

VISOR WEB. EL HIDROGEOPORTAL 319
CONCLUSIONES 320
BIBLIOGRAFÍA 320

LA TELEDETECCIÓN APLICADA A LA GESTIÓN DE LA RECARGA. EJEMPLOS PRÁCTICOS EN DOS EXPERIENCIAS APLICADAS A LA EVOLUCIÓN DE LOS CULTIVOS Y DE LOS HUMEDALES DE ESTOS SISTEMAS. Por Javier Castaños Jover. 321
INTRODUCCIÓN 321
MATERIALES Y MÉTODOS 321
Intervención en la Comarca del Carracillo 322
Evolución de los humedales de la Cubeta de Santiuste 327
CONCLUSIONES 330
BIBLIOGRAFÍA 330

CAPÍTULO 6. LA ARQUITECTURA Y LA HIDROGEOLOGÍA URBANA EN MATERIA DE GESTIÓN DE LA RECARGA 331

SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS). GESTIÓN DEL AGUA Y CIUDAD. Por Ignacio Prieto Leache. 331
INTRODUCCIÓN 331
PROBLEMÁTICA 332
Escenario 332
CICLO URBANO DEL AGUA 332
EFECTO ISLA DE CALOR 333
INCREMENTO ESCORRENTIA URBANA 334
MARCO NORMATIVO ACTUAL 335
SUDS 335
Clasificación tradicional 335
Ventajas de los SUDS frente a otros sistemas 336
A- SISTEMAS DE CONTROL EN ORIGEN 336
B- SISTEMAS DE TRANSPORTE PERMEABLE 337
C- SISTEMAS DE TRATAMIENTO PASIVO 338
D- MEDIDAS PREVENTIVAS 339
NUEVOS SISTEMAS INCORPORADOS A MERCADO 339
RECLASIFICACIÓN 343
APLICACIÓN A PROYECTOS 344
Doniños 344
Parc Bit 345
Guancha 345
La Fombera 346
Aranjuez 346
GIAE: GESTION INTEGRAL DEL AGUA EN LA EDIFICACIÓN 347
CONCLUSIONES 348
BIBLIOGRAFÍA 349

CAPÍTULO 7. HIDROGEOLOGÍA Y AGROHIDROLOGÍA 350

ESTUDIO DE PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LA ZONA NO SATURADA EN LAS INMEDIACIONES DE DOS DISPOSITIVOS DE GESTIÓN DE LA

RECARGA DE ACUÍFEROS. PRESENTACIÓN DE LAS ESTACIONES DINA-MAR ZNS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS RECOPILADOS EN EL PRIMER CICLO DE FUNCIONAMIENTO. Por Enrique Fernández Escalante. 350
RESUMEN 350
INTRODUCCIÓN....350
ENCUADRE 351
OBJETIVOS.... 354
MATERIALES Y MÉTODOS.... 355
DATOS.... 357
Datos termo-pluvio tomados en la Estación meteorológica SG-02 durante el ciclo de recarga artificial.... 357
Datos registrados en la Estación ZNS-1 (Santiuste) durante el ciclo de recarga artificial 358
Datos registrados en la Estación ZNS-2 (Coca) durante el ciclo de recarga artificial 362
RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.... 364
CONCLUSIONES.... 366
BIBLIOGRAFÍA.... 368

TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DE SUELO Y ACUÍFERO (SAT). RESULTADOS DEL PROYECTO DE I+D+i DINA-MAR Y APORTACIONES AL ESTADO DEL ARTE COMO APLICACIONES PRÁCTICAS. Por Enrique Fernández Escalante y Miriam W. Senent del Álamo. 369
RESUMEN.... 369
INTRODUCCIÓN.... 369
OBJETIVOS.... 370
MATERIALES Y MÉTODOS.... 370
RESULTADOS Y DISCUSION 371
Estudio de los impactos de mayor magnitud e intensidad y de diseños inadecuados que afectan a los dispositivos de gestión de la recarga.... 371
Propuestas de diseño e implementación de Técnicas de Tratamiento de Suelo y Acuífero (SATs) y diseños estructurales 374
Corolario de técnicas SAT para aplicar en escenarios análogos.... 377
CONCLUSIONES.... 379
BIBLIOGRAFÍA.... 379

CAPÍTULO 8. HIDROGEOLOGÍA E INGENIERÍA CIVIL 381

CRITERIOS TÉCNICOS PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DE LA RECARGA EN BALSAS Y CANALES TRAS SIETE AÑOS DE GESTIÓN EN LOS DISPOSITIVOS DEL ACUÍFERO DE LOS ARENALES (CUBETA DE SANTIUSTE Y COMARCA DEL CARRACILLO). Por Enrique Fernández Escalante y Óscar Martínez Tejero....381
RESUMEN.... 381
INTRODUCCIÓN.... 381
Marco de actuación.... 382
OBJETIVOS.... 383
MATERIALES Y MÉTODOS.... 383
RESULTADOS Y DISCUSION 384
Estudios de la influencia del periodo y caudal de recarga artificial en la tasa de infiltración y de su manejo para aumentar la efectividad de los canales y balsas.... 384

Periodo 384
Volúmenes de agua empleados para la técnica MAR 385
Actuaciones en la morfología de las balsas de infiltración y canales 386
Balsas de infiltración 386
Canales de recarga artificial (AR) 388
Estudios con cámara termográfica 390
CONCLUSIONES 392
BIBLIOGRAFÍA 394
ENSAYOS DE INFILTRACIÓN 2007-2010. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN. Por Óscar Martínez Tejero. 395
RESULTADOS 395
INTERPRETACIÓN Y REVISIÓN 401
BIBLIOGRAFÍA 403

CAPÍTULO 9. DIFUSIÓN, TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA Y EDUCACIÓN AMBIENTAL 404

CRITERIOS DE DIFUSIÓN, TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA Y EDUCACIÓN AMBIENTAL APLICADOS A LA HIDROGEOLOGÍA, Y, ESPECIALMENTE, A LA GESTIÓN DE LA RECARGA. ALGUNOS EJEMPLOS PARA ESPAÑA. Por Enrique Fernández Escalante, Manuel López Hernández y Rosa Cordero Sánchez. 404
RESUMEN 404
INTRODUCCIÓN 404
OBJETIVOS 405
MÉTODOS 405
ESTADO DEL ARTE 406
DISCUSIÓN 406
Aspectos Generales de la Educación Ambiental y de la divulgación y estrategias aplicadas a la Gestión de la Recarga Artificial (MAR) 406
Objetivos específicos 409
Destinatarios 410
RESULTADOS. PROPUESTA DE UNA ESTRATEGIA DE DyTT 411
Propuesta de una fórmula aplicada 411
Propuesta de una estrategia centrífuga y centrípeta 411
Propuesta de una matriz operativa 414
Materiales seleccionados para cada “Grupo Diana” 418
Impactos 418
Impactos e indicadores de consecución del objetivo 418
Actuaciones en el marco del proyecto DINA-MAR 419
Dirigidas a los grupos especialistas y a las personas con capacidad de resolver el problema 420
Dirigidas a la población en general 421
Dirigidas a las personas involucradas y afectadas por la sequía 423
Dirigidas a grupos escolares 423
CONCLUSIONES 424
BIBLIOGRAFÍA 425
ANEXO 1. LISTADO DE ACTUACIONES DE DIFUSIÓN, TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA Y EDUCACIÓN AMBIENTAL REALIZADAS HASTA LA FECHA EN EL MARCO DEL PROYECTO DE I+D+i DINA-MAR 427

ANEXO 2. DÍPTICOS Y OTROS MATERIALES DIVULGATIVOS ELABORADOS DURANTE EL PROYECTO....431
OTROS MATERIALES DIVULGATIVOS. 445
CALENDARIO DINA-MAR 2008. ANVERSOS Y REVERSOS CON MENSAJES CLAVE 445
OTROS MATERIALES DIVULGATIVOS. 453
LOS CRIS-MAR 2009 Y 2010. ANVERSOS Y REVERSOS 453
OTROS MATERIALES DIVULGATIVOS. 455
CONTRIBUCIÓN EN LA WIKIPEDIA....455
OTROS MATERIALES DIVULGATIVOS. 456
COORDINACIÓN DE LAS PUBLICACIONES P-ISMAR. 456
ANEXO 3. ASPECTO DE LOS PANELES COLOCADOS EN CAMPO PARA DIVULGACIÓN Y DOCENCIA (VISITAS GUIADAS)....458

"CAMINITOS DE AGUA". TRES RUTAS HIDROGEOLÓGICAS EN LA PROVINCIA DE SEGOVIA. ITINERARIO. Por Enrique Fernández Escalante. 460
BIBLIOGRAFÍA 464

CAPÍTULO 10. DINA-MAR. UN TRIENIO DE I+D+i 465

DINA-MAR. PROYECTO PARA LA GESTIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN EL MARCO DEL DESARROLLO SOSTENIBLE. LÍNEAS DE ACCIÓN Y RESULTADOS DE UN CUATRIENIO DE INVESTIGACIÓN. Por Enrique Fernández Escalante, Ignacio Prieto Leache, Mª Ángeles San Miguel Fraile, Carlos Copano González de Heredia y Jon San Sebastián Sauto. 465
INTRODUCCIÓN.... 465
OBJETIVOS.... 466
MATERIALES Y MÉTODOS.... 466
RESULTADOS Y DISCUSION 467
Inventario de dispositivos genéricos existentes y propuesta de otros"nuevos" 467
Estudio para la determinación de las "Zonas MAR" en España y atribución del dispositivo más idóneo 469
Búsqueda de criterios para asociar dispositivos con cada "zona MAR".... 470
Potencial de la técnica MAR en España 472
Aspectos medioambientales.... 473
Metodología para determinar los caudales ambientales en los cauces de toma.... 473
Planificación ambiental 473
Técnicas de Tratamiento de suelo y Acuífero (SATs) y diseños mejorados aplicados a la agro-hidrología 475
MAR aplicada a la gestión hídrica paliativa y a la ingeniería forestal.... 475
Hidrogeología urbana 476
CONCLUSIONES.... 477
BIBLIOGRAFÍA 478

CONCLUSIONES FINALES 479

BIBLIOGRAFÍA GENERAL 483

ANOTACIONES 492

ÍNDICE DE FIGURAS[1]

Figura1-02. Cartografía esquemática del acuífero de Jávea, donde hay operaciones de recarga artificial asociadas al caudal circulante por el río Gorgos. Tomado de IGME-DPA, 1999. 46
Figura 1-03. Zanja filtrante para la recarga artificial del acuífero. Tomado de IGME, 2000. 47
Figuras 1-04 a) y b). Aspecto de dos zanjas filtrantes con diques de contención construidos por los propios agricultores en el cauce del río Gorgos en Javea para incrementar la recarga artificial del acuífero por el lecho del río. 47
Figura 1-04. Esquema de los dispositivos de depuración Tomado de IGME, 2001. 50
Figura 1-05. Esquema de construcción de los pozos con drenes horizontales. Tomado de IGME, 2001. 50
Figura 1-06. Caudales bombeados por la mina de Alquife Tomado de De la Orden et al, 2001. 52
Figuras 1-07 a) a c). Aspecto de las balsas en 1998, en plena operatividad, y en octubre de 2006 tras varios años de abandono. 54
Figuras 1-08 a) y b). Aspecto de la instrumentación (limnígrafos) de los piezómetros de observación en octubre de 2006. Gran parte de ellos están inoperativos. 54
Figura 1-09. Canal bajo del Guadalquivir y batería de 15 pozos de recarga artificial alineados. Escala 1:15.000. 55
Figura 1-10. Dispositivo de toma de agua del canal. 26 de marzo de 2007. 56
Figuras 1-11 a) y b). Aspecto del dispositivo de AR en 1993. 56
Figuras 1-12 a) y b). Aspecto del dispositivo de AR tras años de abandono. Fecha: 26 de marzo de 2007. 56
Figura 1-13. Procesos colmatantes en el lecho del dispositivo. Conducción principal. 57
Figura 1-14. Esquema en planta de los dispositivos de recarga artificial. Tomado de López-Geta, 1994. 58
Figura 1-15. Aspecto general de las captaciones en Lebrija. Abundan los pozos de gran diámetro con el nivel freático a escasa profundidad. 59
Figuras 1-16 a) y b). Pozo de gran diámetro en Lebrija. El nivel freático se encuentra en torno a dos metros de profundidad, lo que dificulta las labores de recarga artificial. La otra captación corresponde a un minisondeo donde se realizaron ensayos de infiltración. 60
Figura 1-17. Mapa geológico del delta del río Llobregat y sus alrededores. Tomado de Almera, 1991. 67
Figuras 1-18 a) y b). Situación y sección del acuífero del Valle Bajo y del Delta del Río Llobregat. Tomado de Armenter, 2006. 68
Figura 1-19. Situación pozos de recarga en profundidad del acuífero del Delta del río Llobregat. Tomado de Armenter, 2006. 69
Figura 1-20. Balsa de Sant Vicenç dels Horts. Foto cortesía de E.Queralt. 70
Figura 1-21. Situación de la barrera hidráulica. Tomado de Ortuño, en IGME, BGM 2009. 71
Figura 1-22. Cubeta de Sant Andreu. Foto: CUACSA. 72

[1] Aquellas fotografías de mayor expresividad que aparecen intercaladas en el texto han sido consideradas "figuras".

Figura.1-23. Balsas de Castellbisbal tras la construcción de la autovía del Baix Llobregat Foto: Comunidad de Usuarios de la Cubeta de Sant Andreu. 73
Figuras 1-24 a) y b). Localización del acuífero de Crestatx. Tomado de IGME, 2007. 77
Figura 1-25. Acuíferos superior e inferior. Tomado de De la Orden y Murillo, Boletín Geológico y Minero, 120, IGME, 2009. 78
Figura 1-26. Dispositivo de recarga artificial propuesto. Tomado de De la Orden y Murillo, Boletín Geológico y Minero, 120, IGME, 2009. 79
Figura 1-27. Situación geográfica del acuífero de los Arenales o UHG 02-17 y su posición dentro de España (Escala del mapa 1:200.000). 80
Figura 1-28. Entorno de la zona de estudio sobre la cartografía 5L del SGE. 80
Figura 1-29. Bloque diagrama del MDT de la zona de estudio con una capa ráster sobrepuesta correspondiente al mapa geológico revisado. 81
Figuras 1-30 a) y b). Cabecera del dispositivo de AR y balsa de decantación de la que parten ambos canales. 82
Figura 1-31. Cartografía con el trazado del canal de recarga artificial y la ubicación de las estaciones de aforo. El mapa presenta además la posición de los ensayos de infiltración realizados a lo largo de los años 2004-2008, de los puntos de la red de control de la piezometría, de las estaciones DINA-MAR ZNS y otros elementos singulares. Escala gráfica. 83
Figura 1-32. Balsa de decantación y represa en Gomezserracín. 84
Figura 1-33. Canal de recarga artificial. 84
Figura 1-34. Interior de la estación de La Cabaña. Tomado de López-Camacho e Iglesias, Canal de Isabel II, 2007. 88
Figuras 1-35 a) y b). Sondeos y balsa en Vall d´Uixo. 89
Figura 1-36. Esquema general de los dispositivos para la recarga artificial. Tomado de AcuaMed. 89
Figura 1-37. Esquema de los dispositivos de recarga artificial. Tomado de Murillo y De la Orden, IGME, 1999. 91
Figuras 1-38 a) a d). Aspecto de los puntos de agua 3031-7-0092, 3031-7-0091 y 3031-7-0058 (2), empleados en la recarga artificial del acuífero. 2 de febrero de 2007. 93
Figura 1-39. Dique del Barranco de Fontilles (Alicante). 94
Figura 1-40. Aspecto de la presa de Isbert el 2 de febrero de 2007. 95
Figura 1-41. Dique en la cabecera del río Coscón. Tomado de Murillo y López-Geta, 2002. 96
Figura 1-42. Variación piezométrica registrada en un sondeo del acuífero durante el periodo 1979-2001. Tomado de Andreu y Pulido-Bosch, 2001. 98
Figuras 1-43 a) y b). Pozos de la batería del canal del Guadiana, Ciudad Real. a) Pozos de 1997. Fotografía tomada en el 2006; b) Pozo realizado en 2010. 100
Figuras 1-44 a) y b). Fuente de San Miguel y Fuente de la Plaza Vieja, en Mecina-Bombarón (Granada). Según información verbal tienen conexión hidráulica con las acequias de careo. 101
Figuras 1-45 a) y b). Desparrame del agua de la acequia de Horcajo y derivaciones para el “riego” a manta, para alimentar las balsas existentes por encima del pueblo. 102
Figura 1-46. Acequias de careo y cartografía geológica. 103
Figuras 1-47 a) y b). El agua, procedente de los ventisqueros, es conducida por acequias y sistemas de compuertas a los careos en un sistema de turnos. 104
Figuras 1-48 a) a d). Campo de infiltración o sima por derivaciones de la acequia de Los Llanillos. Fotografías del 20 de abril de 2007. 106

Figuras 1-49 a) a c). Acequia de Horcajo, campo de infiltración y aspecto de los borbotones que se originan ladera abajo. 20 de abril de 2007. 108
Figuras 1-50 a) y b). Dibujos de mampostería hidráulica por cortesía de Cano-Manuel y del Grupo Tragsa de Granada). a. Estructura del canal protegido por piedras enterradas en tramos de gran pendiente y sujetos a un fuerte desgaste b. Lajas protegiendo el borde exterior del canal. 109
Figuras 1-51 a) y b). Aspecto de los palates o pequeños bancales para la estabilidad de la ladera y protección de los caminos en la acequia de Mecina reconstruidos por el Grupo Tragsa en el año 2000 para el Parque Nacional de sierra Nevada. Fotografías del 21 de octubre de 2006. 109
Figuras 1-52 a) y b). Mampostería hidráulica en la Sima del Tejar. Fotografías del 21 de octubre de 2006.....110
Figuras 1-53 a) y b). Acueducto de mampostería y recuperación de pasos en la Sima del Tejar dentro de los límites del PNSN a unos 1.800 m de altitud. Fotografías del 21 de octubre de 2006.....110
Figura 1-54. Mapa geofísico: la anomalía geofísica (color violeta) señala el yacimiento mineral de Las Cruces en profundidad. CR001: primer sondeo exploratorio. Tomado de CLC. 111
Figura.1-55. Localización de la mina de Las Cruces. Tomado de: CLC.....112
Figura 1-56. Corte geológico de Las Cruces. Tomado de CLC. 112
Figura 1-57. Sistema de protección del acuífero Niebla-Posadas. Esquema conceptual. Tomado de CLC.....115
Figura 1-58. Fases previstas en el proyecto de explotación para el avance de la corta. Tomado de CLC. 116
Figura 1-59. Sondeo tipo de drenaje perimetral.....117
Figura 1-60. Sondeo de reinyección RI004.....119
Figura 1-61. Sondeo de extracción conectado con el circuito. 121
Figura 1-62. Toma de agua del arroyo Camoján. Tomado de Sánchez y Castillo, 2005.....125
Figura 1-63. Posición de los principales dispositivos de gestión de la recarga en España, bien sean previos, dispositivos operativos o proyectos a corto plazo. 125
Figura 2-01. Alguno de los diversos dispositivos de AR que pueden emplearse en la gestión de los recursos hídricos de una cuenca. Figura tomada de UNESCO IHP. 133
Figura 2-02. Icono que representa las balsas de infiltración, diseñado para el desarrollo de mapas temáticos que asocian dispositivos con tipo de acuífero de modo automatizado, en el ámbito del proyecto DINA-MAR.....137
Figura 2-03. Esquema de un dispositivo tipo balsa.....138
Figuras 2-04 a) y b). a) Vista general de una balsa de infiltración situada en la Cubeta de Santiuste, provincia de Segovia; b) Detalle de la cabecera del dispositivo. .139
Figura 2-05. La presencia de pequeñas depresiones en la balsa favorece la acumulación de los materiales más finos en estas zonas. Santiuste de San Juan Bautista, Segovia.....141
Figura 2-06. Balsas de infiltración en la ciudad de Atlantis, para reducir la intrusión marina y mantener la calidad de las aguas subterráneas. Fotos por cortesía de G. Tredoux y I. Dijkstra, 2004 (IAH). 141
Figura 2-07. Detalle de la surgencia con disipador en la balsa de Gomezserracín.....142
Figura 2-08. Detalle del talud de la balsa de infiltración. 144
Figura 2-09. Icono que representa los canales de infiltración, diseñado para el desarrollo de mapas temáticos que asocian dispositivos con tipo de acuífero de modo automatizado, en el ámbito del proyecto DINA-MAR.....145

Figura 2-10. Esquema de un dispositivo de AR tipo canal de infiltración. 145
Figura 2-11. Canal de recarga artificial situado en la Cubeta de Santiuste (Segovia). ..147
Figuras 2-12 a) a d); a) y b) Deslizamientos en una ladera del caz (este) de recarga de la Cubeta de Santiuste, Segovia; c) y d) Caz de recarga revestido en la comarca del Carracillo, Segovia.....148
Figuras 2-13 a) a c). Los canales de AR pueden discurrir sobre fracturas y discontinuidades favoreciendo y aumentando la recarga natural. Montañas de Huarochiri situadas en la cordillera Andina (Lima). Tomadas de Apaza Idme, 2006. 149
Figuras 2-14 a) a c). Varias perspectivas de los careos de Berchules y de Mecina ubicados en las Alpujarras, Granada. 149
Figura 2-15. Imagen de la construcción de una zanja de recarga siguiendo las curvas de nivel, para la captación del agua de lluvia. Tomado de WCT. 152
Figura 2-16. Fotografía de una zanja de infiltración en Hidango (Chile) perteneciente al proyecto de investigación EIAS para la "Determinación de estándares de ingeniería en obras de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos para la conservación e incremento de la productividad silvícola" (2005). Tomado de Flores Villanelo, 2004. 153
Nota: Las formulas para el diseño de zanjas de infiltración se han obtenido del proyecto de investigación EIAS (2005), proyecto conjunto de la Universidad de Talca (Chile) con la Universidad Politécnica de Madrid (España). 154
Figura 2-17. Ejemplo de la sección vertical de una zanja de infiltración, en la que pueden diferenciarse las distintas partes que la forman. Tomado de Flores, 2004. 154
Figura 2-18. Distanciamiento óptimo entre líneas de zanjas y número de líneas de zanjas dentro de cada ensayo. Resultados pertenecientes al proyecto de investigación EIAS para la "Determinación de estándares de ingeniería en obras de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos para la conservación e incremento de la productividad silvícola" (2005). Tomado de Flores, 2005.....154
Figura 2-19. Esquema de un dispositivo tipo SAT. 156
Figura 2-20. Ejemplo de una aplicación de técnicas tipo SAT. Tomado de Fdez. Escalante, 2005. 157
Figura 2-21. La combinación de las técnicas SAT junto con otro tipo de sistemas de recarga artificial mejora la efectividad del dispositivo y reduce considerablemente los costes de mantenimiento. Tomado de Fdez. Escalante, 2005. 158
Figura 2-22. Vista panorámica de la planta de tratamiento de aguas residuales en Shafdan (pretratamiento, reactores biológicos y clarificadores). Tomado de Quipuzco Ushñahua, 2004. 159
Figura 2-23. El icono representa el dispositivo de campos de infiltración, diseñado para el desarrollo de mapas temáticos. 160
Figura 2-24. Esquema de un dispositivo tipo campo de inundación. 160
Figura 2-25. Campo de inundación en la región del Carracillo, Segovia. 161
Figura 2-26. Diagrama esquemático del diseño de las barreras utilizadas para esparcir el agua de escorrentía sobre la llanura de inundación para el riego de las Granjas Nabateas en el desierto de Negev. Tomado de Evenari y Koller, 1956. 161
Figuras 2-27 a) y b). Dos esquemas de un sistema de boqueras del sur de España. Tomado de a) Muñoz, 2003; b) Murcia y el agua. Historia de una pasión, 2005. 162
Figuras 2-28 a) y b). a) Fotografía de un ejemplo de recarga artificial mediante campos de infiltración en el Río Omdel (Namibia), Tomada de IAH; b) desarrollo de las operaciones de mantenimiento de unos campos de infiltración en Eritrea. Tomado de F. van Steenbergen. 163
Figura 2-29. El icono representa la recarga accidental mediante retornos de riego. 165

Figura 2-30 Campo de arroz, regado con aguas regeneradas en la provincia de Badajoz. 165
Figuras 2-31 a) y b). a) Sistema de riego mediante Pivots; b) Riego mediante surcos. .166
Figura 2-32. La tabla muestra relación entre los diversos tipos de sistemas de regadío y la posibilidad de ser utilizados para la recarga artificial de acuíferos. Tomado de Martínez Tejero, 2008 (en memoria técnica de DINA-MAR). 166
Figuras 2-33 a) y b). Complejo sistema de acequias y azarbes de Murcia; b). Azarbe en Alicante. Tomadas de: a) Murcia y el agua. Historia de una pasión, 2005; b) Parc Natural Agrari Els Carrissals. 167
Figura 2-34. Esquema de la recarga artificial mediante retornos de riego. 167
Figura 2-35. Esquema de un dispositivo de recarga artificial, tipo diques de retención/represa. 170
Figura 2-36. El icono representa el dispositivo de recarga mediante diques de retención/represas, diseñado para el desarrollo de mapas temáticos. 172
Figura 2-37. Esquema de un dispositivo de recarga artificial, tipo diques de permeables/presas de arena. 173
Figuras 2-38 a) y b). a) Fotografía de un dique permeable construido por los agricultores de la zona de La Marina, en el cauce del río Girona, (Alicante); b) Dique permeable que genera una laguna aguas arriba de la presa, (Laguna Neila, Burgos). .174
Figuras 2-39 a) y b). Imagen de una presas de arena, en las que puede verse la formación del depósito de materiales aguas arriba del dique. A) Barranco de las Ovejas, Alicante. Tomada de J. Nicolás; b) Presa de arena en África. Foto por cortesía de Sander de Haas. 175
Figura 2-40. Esquema de un dispositivo de recarga artificial mediante serpenteos. 181
Figuras 2-41 a) y b). Imágenes de satélite de los dispositivos de AR, mediante serpenteos en el río Santa Ana en Anaheim, California (EEUU) (2008). Fotos por cortesía de A. Hutchinson. 182
Figuras 2-42 a) y b). Diferentes vistas de las actuaciones MAR en el río Santa Ana, en Anaheim, junio de 2006. Fotos por cortesía de A. Hutchinson. 182
Figura 2-44. Esquema de la escarificación del lecho del río. 185
Figura 2-45. El icono representa el dispositivo de recarga mediante escarificado del lecho del río. 185
Figura 2-46. Aspecto del prototipo BCV-3 desarrollado por la OCDW. Foto por cortesía de A. Hutchinson. 187
Figura 2-47. Operación de escarificado en el lecho del río Llobregat (Barcelona) para favorecer que el agua circulante por el cauce recargue al acuífero. Fotografía por cortesía de Armenter, 2006. 188
Figura 2-48. Esquema de un dispositivo de recarga artificial mediante la instalación de diques sub-superficiales. 189
Figura 2-49. Presa subsuperficial en África. Foto por cortesía de Sander de Haas. 190
Figura 2-50. El icono representa el dispositivo de recarga mediante diques subsuperficiales, diseñado para el desarrollo de mapas temáticos. 190
Figura 2-52. Esquema de un dispositivo de gestión de la recarga mediante diques perforados. 191
Figuras 2-53 a) a d). a) Dique perforado situado en Santa Cruz de la Zarza, Toledo; b) Dique perforado en el Llevant, Mallorca. Fotos b) tomada de A. Martínez (MARM); c) y d) dique perforado para laminación de avenidas y recarga artificial en Dels Ports, Tarragona, que permite además la presencia de una fuente en su parte central. 192

Figura 2-54 a) y b). Balsas de infiltración en la cuenca del río Omaruru (Namibia); b) Vista aérea de la presa de Omdel. Fotos: a) Tomada de Tredoux (IAH, 2002); b) Tomada de Albrechts, 1994. 193
Figura 2-55. Posibles rutas de difusión de la tecnología de recarga artificial mediante qanats. Tomado de www.waterhistory.org/histories/qanats/....194
Figura 2-57. Esquema de un dispositivo de qanats. 195
Figuras 2-58 a) y b). a) Ejemplo de un molinete utilizado para la extracción del material de desecho desde el túnel principal hasta la superficie, (fotografía de un molinete en el museo de Turpan, China), b) Esquema de un qanats durante su construcción. Tomadas de: a) www.waterhistory.org/histories/qanats; b) H.E. Wulff, 2004. 196
Figura 2-59. Esquema general de un qanat. Tomado de www.waterhistory.org/histories/qanats/ 196
Figura 2-60. Vista aérea las ruinas aéreas de Persépolis (Irán), dónde se observan, alineados, los pozos de ventilación de los qanats. Tomado de Wulff, 2004. 197
Figuras 2-61 a) y b). a) Personal encargado de la construcción de un qanats utilizando anillos de arcilla cocida para reforzar las zonas inestables del túnel; b) Ejemplo de un molinete utilizado para la extracción del material de desecho. Tomado de H.E. Wulff, 2004. 198
Figura 2-62. Icono diseñado para la representación de dispositivos tipo pozo de infiltración. 199
Figura 2-63. Esquema de un dispositivo de pozos abiertos de infiltración y pozos profundos. 199
Figuras 2-64 a) y b). a) Pozo abierto de infiltración de gran diámetro en Graz, Austria; b) Pozo abierto de infiltración en Arizona, EEUU. 200
Figura 2-66. Esquema de un dispositivo de pozos profundos. 201
Figuras 2-67 a) y b). Pozo profundo de infiltración que emplea como fuente aguas fluviales del Canal del Guadiana, Ciudad Real. 202
Figura 2-68. Construcción de un pozo en enero de 2010. Canal del Guadiana, Ciudad Real. Foto por cortesía de D. Moraga, 2010. 203
Figura 2-69. Ejemplo de un esquema constructivo de un pozo para recarga artificial (Por cortesía de la CHG, 2010). 203
Figura 2-70. Construcción de los elementos auxiliares de un pozo profundo de MAR. Foto por cortesía de D. Moraga, 2010. 204
Figura 2-72. Esquema de un sondeo de inyección. 205
Figuras 2-73. Sondeo de inyección y extracción, Cornellá, Barcelona. 206
Figura 2-74. Sondeo de la barrera hidráulica en el Llobregat. Octubre de 2007. 207
Figura 2-76. Esquema de un sistema de recarga mediante dolinas y colapsos. 208
Figura 2-77 a) y b). Imagen de una dolina-pozo empleada para recarga artificial en Els Poblets (izquierda) y b) colapso de Pedreguer (derecha) en Alicante. 209
Figura 2-78. Iconos diseñados y propuestos por DINA-MAR para la representación de dispositivos tipo ASR y ASTR. 210
Figura 2-79 a) y b). Esquema de un sistema de recarga artificial tipo ASR, fases de inyección y de recuperación. 210
Figuras 2-80 a) y b). a) Imagen de sistemas ASR en Arizona (EEUU); b) ASR en Adelaida, (Australia del Sur). 212
Figuras 2-81 a) y b). Esquema de un sistema de recarga artificial mediante ASTR y aspecto de un dispositivo ASTR en California. 215
Figura 2-82. Dispositivos de ASR en Adelaida. 217
Figura 2-83. Esquema de sondeo tipo de drenaje perimetral. Tomado de CLC, 2009. 218

Figura 2-84. Esquema general de un sondeo de reinyección tipo. Tomado de CLC, 2009. 219
Figura 2-86. Esquema de un sistema de recarga artificial a través de bancos filtrantes en lechos de ríos o RBF. 221
Figuras 2-87 a) y b). Pozos de infiltración tipo Ranney (detalle de los drenes radiales) y pozo tipo Felhmann (respectivamente) asociados a un RBF en el margen del río Ebro, Tudela, Navarra. 222
Figura 2-88. Infiltración inducida en la margen del río Danubio, Budapest. Foto cortesía de H. Szabó Sándor, 2005 (IAH). 223
Figura 2-90. Esquema de un sistema de recarga artificial mediante filtración interdunar. 224
Figuras 2-91 a) y b). Filtración interdunar en Ámsterdam, Países Bajos, tomada de AWS, 1998 (IAH); b) Filtración interdunar en el Carracillo, Segovia (sistema dunar interior). 225
Figura 2-93. Esquema de un sistema de recarga artificial a través de un sistema de riego subterráneo. 226
Figuras 2-94 a) y b). a) Esquema de un sistema de recarga artificial mediante riego subterráneo (Martínez, 2008); b) Ejemplo de un campo donde hay instalado un sistema de riego subterráneo. 227
Figuras 2-95 a) a c). a) La utilización de muros de piedras de contorno; b) Terraza individuales; c) Barreras muertas. Tomadas de: http://www.tierramor.org/permacultura/suelos&agua.htm. 229
Figuras 2-97 a) a c). a) Modelo esquemático de la técnica de captación de agua de lluvia “in situ” para frutales o cultivos perennes con microcuencas de captación individual para cada árbol (izquierda). b) Sección entre dos bordos antierosivos, donde se muestra la superficie destinada a escorrentía y siembra. La superficie de cultivo y de infiltración corresponde a la zona denominada como “L”, situada aguas arriba del bordo o muro; el resto corresponde a la superficie de intercepción (derecha superior). c) Técnica de captación de lluvia a través del modelo “W” (derecha inferior). Tomado de Velasco Molina, 2000. 230
Figura 2-98. Icono propuesto para representar el dispositivo de recarga mediante captación de agua de lluvia en improductivo. 230
Figura 2-99. Esquema de un sistema de captación de agua de lluvia en techos. 231
Figura 2-100. Imagen de un sistema de captación y almacenamiento de agua de lluvia para riego y uso domestico no potable. Tomado de http://www.construible.es/noticiasDetalle.aspx?id=2453&c=6&idm=10&pat=10 231
Figura 2-101. Icono propuesto para representar la recarga artificial “accidental” por fugas de conducciones y alcantarillado. 233
Figura 2-102. Esquema de un sistema de recarga accidental por conducciones y alcantarillado. 233
Figuras 2-103 a) y b). Varias noticias en las que la rotura de tuberías del canal de abastecimiento principal de Madrid, produce diversas inundación y demás problemas. 234
Figuras 2-104 a) y b). Ejemplo de dos sistemas de conducción de agua deficientes, en los que se observan varias zonas de pérdida. 234
Figura 2-105. Icono propuesto para representar los dispositivos tipo SUDS 235
Figura 2-106. Esquema de un ejemplo de Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS). 235
Figuras 2-107 a) y b). a) Pavimentos permeables en el parque Gómeznarro, Madrid; b) Aparcamiento permeable en Hallstatt, Austria. 236

Figura 2-108. La utilización de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) favorece el control de inundaciones ya que aumentan la superficie de infiltración efectiva. 237
Figura 2-109. Ejemplo de un humedal artificial, Bolivar, Adelaida (AS).....238
Figuras 2-110 a) y b). Ejemplos de franja filtrante en Burdeos, Francia y filtro de grava confinada en Arganzuela, Madrid.....238
Figura 2-111. La instalación de un sistema de drenaje urbano favorecerá el control de las inundaciones en Madrid.....239
Figura 2-112. Síntesis de todos los dispositivos descritos, con su correspondiente icono, esquema y ejemplo (fotografía). 242
Figuras 3-01. a) y b). La realización de surcos o zanjas de contorno, además de reducir significativamente la erosión hídrica aumentan el tiempo de permanencia del agua en la ladera, favoreciendo la infiltración natural, la recarga de los acuíferos y el mejor desarrollo de la posterior plantación. 259
Figura 3-02 Ladera abancalada. Gran cantidad de estas magníficas obras de corrección, están hoy día abandonadas. Su mantenimiento y repoblación forestal facilitan un mejor aprovechamiento hídrico de las aguas de escorrentía. Zona de Morella (Castellón).....260
Figura 3-03. Dique en un torrente de Sierra Nevada (Granada). Laminan el caudal punta y aumentan la infiltración natural.....261
Figuras 3-04. a) y b). Dique en el torrente Salado (Lanjarón, Granada) en el momento de su construcción, década de 1950, y en la actualidad. La presencia del dique ha favorecido el desarrollo de un ecosistema muy valioso (las flechas en rojo señalan el mismo elemento en ambas fotos).....261
Figura 3-05. Zanja de drenaje en una ladera. La recolección del agua de lluvia, reduce la erosión y permite un mayor a aprovechamiento de la escorrentía. Navarra. .262
Figura 3-06. Pequeña presa para embalsar agua, P.N. de Cabañeros (Ciudad Real). .262
Figuras 3-07 a) y b). a) Croquis de boqueras en una rambla. (Tomado de Ecología Fuera de Serie. ICONA. 1990) y b). Croquis de atochadas. Las líneas marcan el recorrido de las aguas (Tomado de “Ecología Fuera de Serie”. ICONA. 1990). 263
Figura 4-01. Etapas para el establecimiento de una nueva experiencia de gestión de la recarga conforme a aspectos medioambientales y farmacológicos, de acuerdo con los criterios establecidos en EPHC 2008. Traducido de EPHC, 2008, y de Dillon, 2009.....277
Figura 4-02. Definición de indicadores.....281
Figura 4-03: Procedimiento de elaboración de indicadores.....281
Figura 4-04. Modelo de indicadores PER para la recarga artificial.....282
Figura 5-01: Cálculo concentración de nitratos.....307
Figura 5-02: Polígonos concéntricos entorno a ríos.....309
Figura 5-03. Subcuencas con excedentes.....316
Figura 5-04. Proceso de cálculo de la puntuación para el dispositivo D1.....318
Figura 5-05. Proceso de cálculo de la puntuación para el dispositivo D1.....318
Figura 5-06. Aspecto del Visor Web o “hidrogeoportal”. 319
Figura 5-07. Detalle del cálculo del dispositivo óptimo. 320
Figura 5-08. Imagen área (2002) sobre el área de actuación, disponible en el archivo del CNIG. Dehesa Boyal, extremo Este de la Comarca.....322
Figura 5-09. Imagen de mayo de 2010 Ikonos de fusión en Color Natural sobre la zona de actuación y detalle sobre una de las zonas de actuación. Balsas de Gomezserracín. 322

Figuras 5-10 a) y b). Imágenes de mayo de 2010 Ikonos de fusión en Color Natural e Infrarrojo sobre la zona de actuación (extremo oeste de la Comarca). 323
Figuras 5-11 a) a c). Situación previa a la actuación en el área de Carracillo, año 2004 (ortofoto de SIGPAC (0.5 m)). 324
Figuras 5-12 a) a c). Situación tras la actuación en el área de Carracillo, año 2008 (ortfoto de SIGPAC (0,5 m)). 325
Figuras 5-13 a) a c). Situación tras la actuación en el área de Carracillo, año 2010 (Fusión Ikonos en Falso color infrarrojo (1m)). 326
Figuras 5-14 a) y b). Cubeta de Santiuste. Imágenes del Plan Nacional de Teledetección. julio 2005 SPOT 5, infrarrojo y color natural respectivamente. 327
Figuras 5-15 a) y b). Imagen Landsat 5 TM fechada el 18 de marzo de 2007. Se observa como en primavera los tres humedales (dos naturales y uno artificial están inundados). 328
Figuras 5-16 a) y b). Imagen aérea 1977 (CNIG) y Ortofoto SIGPAC (0.5m). 328
Figuras 5-17 a) y b). Imagen SPOT 5 PNT (2.5m) e Imagen Landsat 5 TM (30m). 328
Figura 5-18. Ortofoto con el trazado del canal de MAR y los humedales de las Eras y de la Iglesia, margen superior y de izquierda a derecha. 329
Figura 5-19. Detalle de la balsa de recarga / humedal artificial del Sanchón. 329
Figura 6-01 a) y b). Inundaciones en distintas ciudades españolas. Fotos: http://www.elmundo.es 331
Figura 6-02. Ciclo natural del agua. Foto: http://www.creciendo.andamiratu.com 333
Figura 6-03. Ciclo Urbano del agua. Tomado de: Urban water cycle processes and interactions. Unesco publishing. 333
Figura 6-04. Isla de calor. Tomado de Wikipedia. 334
Figuras 6-05 a) y b). Incremento de escorrentía urbana en periodos de precipitación intensa. 334
Figura 6-06. Cadena de Gestión. Fuente: Ciria. 336
Figuras 6-07 a) y b). Diferentes tipos de cubiertas vegetales. Foto: b) Gernot Minke. 337
Figura 6-08. Humedal artificial urbano en Adelaida (Australia del Sur). 339
Figuras 6-09 a) y b). a) Pavimento poroso, placa Nidagravel; b) Sistema tipo Babylon. Fotos: a) http://www.nidagravel.be/UKEN/site/index.aspx; b) Jochen Scheerer. ASEPMA. 340
Figuras 6-10 a) y b). a) Adoquín con junta abierta preparada; b), Urinario seco. Fotos: http://www.urimat.es/ 340
Figuras 6-11 a) y b). Asfalto poroso. Fotos: http://www.ecocreto.com/ 341
Figuras 6-12 a) a c). Filtro para bajante; b y c) Arquetas separadoras de grasas. Fotos: a) http://www.blipposol.com/; b y c) http://www.remosa.net/ 342
Figuras 6-13 a) y b). a) Depósito Carat (GRAF); b) Depósito Rondus (GRAF). Fotos: a y b) http://www.grafiberica.com/ 342
Figuras 6-14 a) as c). a) Domótica. Control telemático; b) Canalón lineal; c) Depuración por lechos de juncos. Fotos: a) http://www.dexmatech.com/; b) http://www.aco.es; c) http://grupoterravita.com/es/. 343
Figura 6-15. Re clasificación SUDS. 343
Figura 6-16 a) y b). a) Mapa de proceso de desertificación por provincias; b) Esquema del agua para la ciudad. Fotos: a) http//www.marm.es. 344
Figuras 6-17 a) y b). Cubierta vegetal y recuperación de agua de lluvia. Proyecto de Equipamientos municipales del puesto de Socorrismo y Salvamento e Instalaciones Municipales de Actividades Náuticas en la playa de Doniños. 345
Figura 6-18. Cubiertas vegetales en edificio de investigación, ParcBit. 345

Figuras 6-19: Proyecto de cubierta vegetal en edificio para bomberos en La Guancha, Tenerife. 346
Figuras 6-20 a) a c). Aprovechamiento y recorridos del agua en Proyecto de Campus Dotacional en la parcela de La Fombera, La Rioja. 346
Figura 6-21: Bermas anti-erosión: Proyecto de recuperación de la azuda de la montaña, rehabilitación del acueducto y de su entorno en Aranjuez, Madrid. 347
Figuras 6-22 a) a c). Del campo a la ciudad: puntos para posibles mejoras del tratamiento del agua. 347
Figura 6-23. El agua no debería enterarse de su paso por las poblaciones. 349
Figura 7-01. Trazado del dispositivo de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste. 352
Figuras 7-02 a) y b). Cabecera del dispositivo de AR y balsa de decantación de la que parten ambos canales. 354
Figura 7-03. Configuración de las estaciones DINA-MAR ZNS y sensores instalados (tomado del proyecto de obra, Tragsatec, 2007). 356
Figuras 7-04 a) y b)- Instrumentación instalada en las estaciones DINA-MAR ZNS (tensiómetros y humidímetros) y aspecto del Microterm. 356
Figuras 7-05 a) y b). Aspecto de la estación DINA-MAR ZNS 1 en Santiuste de San Juan Bautista (Segovia) y DINA-MAR ZNS 2 en Villagonzalo de Coca (Segovia). 357
Figura 7-06. Pluviograma de la estación meteo SG-02, Nava de la Asunción, para la duración del ciclo de gestión de la recarga. 358
Figura 7-07. Termograma de la estación meteo SG-02, Nava de la Asunción, para la duración del 7º ciclo de gestión de la recarga en la Cubeta de Santiuste. 359
Figura 7-08. Gráfica de humedad registrada en la estación DINA-MAR ZNS 1 de Santiuste para la duración del 7º ciclo de recarga artificial en la Cubeta de Santiuste. Profundidad de los sensores: 0,5 y 2,0 m. 360
Figura 7-09. Gráfica de temperatura registrada en la estación DINA-MAR ZNS 1 de Santiuste para la duración del 7º ciclo de recarga artificial en la Cubeta de Santiuste. Profundidad de los sensores: 0,5 y 2,0 m. 361
Figura 7-10. Gráfica de tensión capilar registrada en la estación DINA-MAR ZNS 1. Profundidad del sensor 1,0 m. 362
Figuras 7-11 a) y b). Gráficas de humedad y temperatura registradas en la estación DINA-MAR ZNS 2 de Coca para la duración del 7º ciclo de recarga artificial en la Cubeta de Santiuste. Profundidad de los sensores: 0,5 y 1,1 m. 363
Figura 7-12. Gráfica de tensión capilar registrada en la estación DINA-MAR ZNS 2. Profundidad del sensor 1,05 m. 364
Figura 7-13. Instalaciones de gestión de la recarga (MAR) en las que se ubican las zonas piloto donde se han llevado a cabo los ensayos precisos para redactar este texto. 1- Cubeta de Santiuste, 2- Comarca del Carracillo (provincia de Segovia) y 3- Canal del Guadiana (Ciudad Real). 371
Figura 7-14. Ejemplos y posición de los mayores impactos y diseños inadecuados detectados que afectan a las instalaciones de MAR y algunas líneas de acción a adoptar. Modificado de Fdez. Escalante, 2005. 372
Figura 7-15. Propuesta de técnicas SAT y diseños estructurales para la solución de los mayores impactos detectados y diseños inadecuados que afectan o afectaban a las instalaciones MAR. Ejemplo para la Cubeta de Santiuste (los resultados de las restantes zonas piloto también se han sintetizado en la cartografía): 1-2. Tramos filtrantes intercalados en tuberías que atraviesan zonas con escasa disponibilidad de terreno superficial. 3- Nuevos sistemas RBF cercanos a los embalses de toma. 4- Diseños mejorados para pozos MAR de gran diámetro. 5- Dispositivos para reducir la concentración de aire disuelto en el agua de recarga. 6-7- Regeneración hídrica

de humedales por dispositivos de MAR inducida. 8-9. Diseños para reducir la colmatación y el efecto Lisse en los pozos, canales y balsas de infiltración. BCV específicos para estas zonas piloto. Modificado de Fdez. Escalante, 2005. 375
Figuras 7-16 a) y b). Corolario. Listado de opciones para resolver problemas que afectan a dispositivos MAR mediante técnicas SAT, nuevos diseños y cambios en los parámetros de gestión. Las operaciones pueden se aplicadas en las aguas de recarga (en cantidad y/o calidad), en el medio receptor (suelo y/o acuífero) y en los parámetros de gestión, limpieza y mantenimiento. Modificado de Fdez. Escalante, 2005. 378
Figura 8-01. Posición geográfica del acuífero de Los Arenales, también llamado Unidad Hidrogeológica 02-17, y su posición dentro de España (mapa a escala 1:200.000). 383
Tabla 8-01 y figura 8-02. Tasa de infiltración a lo largo del ciclo de AR 2004/05 en una zona aislada del canal de Santiuste dentro del canal Este. 384
Figura 8-03. Relación entre los volúmenes para MAR tomados del río Voltoya y los incrementos en el almacenamiento del acuífero cuantificados mediante el método WTF (Water Table Fluctuation) para el cuatrienio inicial y para el Canal Este o "viejo". 385
Figuras 8-04 a) a d). Caballones arados con diferente anchura en el fondo de la balsa de decantación e infiltración; ensayo de permeabilidad mediante infiltrómetros de doble anillo en la zona convexa y concava superficial de los caballones, perfil de colmatación y estudio de los procesos colmatantes. Cabecera del dispositivo de la Cubeta de Santiuste. 387
Figuras 8-05 a) a d). Gráficas de interpretación del ensayo con infiltrómetro de doble anillo en la balsa 3, con longitud de onda entre surcos de 0,6 y 0,8 m, realizados en junio de los años 2007 a 2010. Gráficas de resultados e interpretación de 2008. 388
Figuras 8-06 a) y-b). Instalación de geotextiles en el fondo del canal de AR en la Cubeta de Santiuste en noviembre de 2008 y ensayos de infiltración siete meses después. 389
Figuras 8-07 a) a d). Ensayos de infiltración en la estación IN-1 de Septiembre de 2007, Junio de 2008 y 2009. Gráficas de resultados de los ensayos de infiltración con infiltrómetro de doble anillo y su interpretación. 390
Figuras 8-08 a) y b). Comparación entre los aspectos de una fotografía normal y una termografía, con objeto de detector procesos colmatantes. 391
Figuras 8-09 a) y b). Comparación entre los aspectos de fotografías y termografías en la zona de mezcla del vertido desde la depuradora por lagunaje de Santiuste de San Juan Bautista al canal de recarga artificial. 392
Figura 8-10. Curvas del punto de ensayo IN-1 395
Figura 8-11. Fotografía del punto de ensayo IN-11 396
Figura 8-12. Curvas del punto de ensayo IN-11. 397
Figura 8-13. Fotografías del punto de ensayo IV-5. 397
Figura 8-14. Curvas del punto de ensayo IV-5. 397
Figura 8-15. Fotografía del punto de ensayo IN-0. 398
Figura 8-16. Curvas del punto de ensayo IN-0. 398
Figura 8-17. Fotografía del punto de ensayo IN-0. 399
Figura 8-18. Curvas del punto de ensayo IN-0. Separación de 0,6 m en los surcos. Los gráficas superiores corresponden a ensayos realizados en crestas y las inferiores en valles. 399

Figura 8-19. Curvas del punto de ensayo IN-0. Separación de 0,8 m en los surcos. Los gráficas superiores corresponden a ensayos realizados en crestas y las inferiores en valles. 400
Figura 8-20. Fotografía del punto de ensayo IN-0. 400
Figura 8-21. Fotografía de la zona de estudio. 401
Figura 9-01. Diagrama de Kiwiatt, indicador de la alta complejidad de cualquier proyecto de transferencia de tecnología. 408
Figura 9-02. Ideograma de un Plan de Acción que combina la información general y particular (diagnóstico) con las estrategias planificadas (objetivos estratégicos), (modificado de Tapp, 2002). 408
Figura 9-03. Mapa ilustrativo de la gestión de los recursos tecnológicos enfocado a grupos Diana y diferenciando siete tecnologías diferentes (modificado de Tapp, 2002). 409
Figura 9-04. Ideograma propuesto para la estrategia de DyTT, con mención de los círculos de difusión y grupos diana (modificado de Fdez. Escalante, 2009). 413
Figura 9-05. Grupos Diana receptores del proceso sinérgico de combinar estrategias de DyTT y de educación ambiental. 414
Tabla 9-01. Matriz y listado de chequeo genérico para el proceso de DyTT combinado con estrategias de educación ambiental. La matriz tiene carácter abierto para su modificación conforme a circunstancias específicas. 417
Tabla 9-02. Matriz genérica para el proceso de DyTT + EE adaptada para y propuesta al Grupo Tragsa para la difusión de proyectos de i+D+i relacionados con el agua y especialmente con la gestión hídrica. 419
Figuras 9-06 a) y b). Participación en foros técnicos con presentación de novedades y experiencias en MAR. EXPO Zaragoza y CONAMA. 420
Figuras 9-07 a) y b). La IAH organiza simposios periódicos sobre MAR. España podría ser país candidato para el futuro próximo. 421
Figuras 9-08 a) y b). Visita guiada a las instalaciones de ASR para el almacenamiento profundo en Adelaida, (ISAR 4) y a las instalaciones de recarga artificial y abastecimiento de Berlín (ISMAR 5). 421
Figuras 9-08 c) y d). Pósters divulgativos de experiencias españolas presentados en foros técnicos nacionales e internacionales. 422
Figuras 9-09 a) y b). Notas de prensa en edición digital y en papel. 422
Figuras 9-10 a) y b). Páginas Web del grupo de trabajo de recarga artificial de acuíferos de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH). Fuente: http://www.iah.org/recharge/ y del proyecto DINA-MAR. 424
Figura 9-11. Cartografía esquemática del sector NO de Segovia y posición de las rutas hidrogeológicas propuestas y sus paradas (orientado al norte y con escala gráfica). 462
Figura 9-12. Portada de la “Guía Itinerario”, accesible por Internet. 462
Figura 9-13. Panel de la “Guía Itinerario”, accesible por Internet (página siguiente). 462
Tabla y figura 10-01. Inventario de dispositivos de gestión de la recarga de acuíferos (MAR) agrupados por tipologías (modificado de Gale, 2005). 467
Figura 10-02. Distribución de las “zonas MAR” en la cuenca del río Duero, las más proclive a la recarga artificial del territorio español. 470
Figura 10-03. Cartografía provisional con la atribución de los dispositivos MAR más idóneos para cada “zona MAR”. 471
Figura 10-04. Ejemplo para el acuífero del Bajo Guadalhorce (Málaga). Propuesta de la ubicación de dispositivos MAR, obtenido con el sistema matricial rangos-pesos designado hidrogeoportal DINA-MAR. 472

Figuras 10-05 a) y b). Regeneración de la Laguna de la Iglesia. Segovia, a) Febrero 2006; b) Mayo 2006.....480
Figuras 10-06 a) y b). Ángel de la Independencia de México. A la hora de construir este monumento, se realizó una cimentación importante, pero el terreno de alrededor, con el paso de los años, sufrió asientos y por ello, hubo que construir una escalinata para llegar a él (véase la foto de la dcha). Tomado de http://www.exploramex.com/epocaIndep/Terrem1985.htm.....481

DINA-MAR

Depth Investigation of New Activities for Managed Aquifer Recharge

LA GESTIÓN DE LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS EN EL MARCO DEL DESARROLLO SOSTENIBLE

DESARROLLO TECNOLÓGICO

PRÓLOGO

La recarga artificial de acuíferos (en adelante AR[2] o MAR[3]) se ha configurado en los últimos años como una herramienta de gestión hídrica económica y de gran efectividad con respecto a las grandes obras hidráulicas, resultando una actividad de primer orden en varios países del mundo, como pueden ser Holanda, USA, Australia, Israel, etc.

A pesar de haber existido antecedentes de recarga artificial en España, al menos desde la época árabe, como son los *careos* alpujarreños o el sistema de diques y boqueras levantinos *(Díaz-Marta, 1989)*, esta técnica ha estado infrautilizada en las últimas décadas. Actualmente se encuentra en estado emergente y empieza a recibir una incipiente atención por parte de la administración hidráulica del país.

El volumen anual medio de recursos hídricos resultantes de operaciones de AR en España asciende a 380 hm^3/año, según los resultados del propio proyecto. A pesar de tan escaso volumen, fuentes oficiales consideran que los resultados obtenidos en las últimas experiencias llevadas a cabo en España son "esperanzadores". Estos resultados son cuestionados más adelante.

El proyecto ha estado adscrito al programa 310.200: "Programa Nacional de Ciencias y Tecnologías Medioambientales", Subprograma Nacional de tecnologías para la gestión sostenible medioambiental".

---

[2] *AR:* Artificial Recharge. Se trata del acrónimo más empleado en foros internacionales de recarga artificial de acuíferos y en Internet junto con "MAR." Se ha encontrado en tantas citas y documentación que, finalmente, y con el objetivo de homogeneizar con la comunidad científica internacional, se ha optado por emplear el término en las alusiones a "recarga artificial" a lo largo de todo el trabajo, a pesar de ser un acrónimo sajón.

[3] *MAR:* Este término tiene su origen en el grupo de trabajo para el estudio de operaciones de recarga artificial fundado por la AIH en 1998 dirigido por Mr. Ivan Johnson, consultor del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), activista con más de 30 años de experiencia en investigación y desarrollo (I+D) y director del ASCE/EWRI (Standards Committee for Artificial Recharge). El grupo celebró su primera reunión en noviembre de 2000 con motivo del 30 aniversario de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH). En tal acontecimiento se decidió modificar el término *AR* (*Artificial Recharge*) para referirse a operaciones de recarga artificial, por *MAR* (Management of Aquifer Recharge o Managed Aquifer Recharge) o gestión de la recarga de acuíferos, incorporando los procesos naturales de recarga y configurando una herramienta vital para el desarrollo sostenible de los recursos hídricos del planeta.

INTRODUCCIÓN

La recarga artificial de acuíferos, gestión de la recarga o MAR es una técnica concebida para la infiltración de agua en los acuíferos de manera intencionada.

En este trabajo de investigación se ha pretendido elevar el grado de conocimiento de la técnica de la recarga artificial de acuíferos en la sociedad española, y aportar un "granito de arena" para que la misma, considerada todavía una técnica "especial", "alternativa" y casi desconocida, comience a formar parte de la idiosincrasia española. Para ello se ha avanzado tanto en conocimientos técnicos como divulgado resultados y experiencias, conforme a un plan de Difusión y Transferencia Tecnológica (DyTT) elaborado en la concepción del proyecto.

El trabajo se ha estructurado del siguiente modo:

En primer lugar se ha estudiado el "estado del arte", actualizando el inventario de experiencias de gestión de la recarga en España, así como el de tipologías de dispositivos a nivel internacional. A este respecto cabe destacar la inclusión de dos nuevos diseños, con ensayos prácticos en campo. Estos son los dos capítulos de mayor extensión de la publicación. El segundo incorpora además datos relativos a diseños constructivos y recomendaciones de mejora, emanadas de la experiencia adquirida en el desarrollo del proyecto de investigación.

A continuación se abordan diferentes aspectos de la gestión de la recarga de acuíferos, empezando por las consideraciones medioambientales (condicionantes y caudales ambientales, indicadores, etc.), seguido por aspectos relacionados con la gestión forestal como técnica de gestión hídrica paliativa y la infiltración en áreas de cabecera de cuenca. Más tarde se abordan los aspectos relacionados con la geografía y teledetección, siguiendo por el punto de vista arquitectónico y la hidrogeología urbana. Posteriormente se entra en los aspectos hidrogeológicos, tanto en Zona No Saturada (ZNS) como saturada, técnicas SAT y otros resultados prácticos derivados del monitoreo en las zonas piloto. Se ha añadido un artículo sobre criterios de difusión, transferencia de tecnología y educación ambiental y propuesto una serie de "rutas hidrogeológicas" como acción más destacable. Finalmente se presenta un artículo a modo de resumen y conclusiones.

Al ser una publicación "de cierre" de un proyecto de investigación, gran parte de los resultados presentados se apoyan en datos que no se han incluido en los distintos apartados, pero que se encuentran en las memorias parciales de las distintas anualidades del proyecto, donde debería remitirse el lector interesado.

Las aportaciones de los distintos investigadores y colaboradores confluyen en un nodo común: la gestión de la recarga, a pesar de ser una técnica relativamente joven, se perfila como una de las alternativas hídricas de vanguardia con gran futuro, junto con la desalación, puede ser considerada reutilización, en tanto que nuestra legislación la considera un "vertido" y cabe esperar que vaya logrando cada vez mayor peso en la sociedad española.

Ya por último, cabe mencionar que en el desarrollo de este trabajo se ha prestado una especial atención al respeto a los derechos de autor y a la protección de datos de carácter personal. Todas las figuras, tablas y fotografías tienen mención expresa de su autoría (derecho de cita), y, en caso de carecer de tal mención, corresponden a los autores.

OBJETIVOS Y PRETENSIONES DE DINA-MAR

Los objetivos propuestos han sido desglosados y jerarquizados en genéricos y específicos, desglosados de acuerdo con los hitos establecidos en la planificación del proyecto: técnicos, medioambientales, divulgativos y comerciales.

Objetivos genéricos del proyecto

El objetivo estratégico perseguido puede ser desglosado en las siguientes líneas de "investigación-acción":

- Desarrollo de una tecnología de gran utilidad dadas las circunstancias ambientales y sociopolíticas del país, en las que el agua es cada día un bien más escaso y dotado de carácter estratégico.

- Desarrollo de una tecnología alineada con las actuaciones relativas a combatir el cambio climático, la desertización, las sequías y otras amenazas que ponen en peligro el desarrollo sostenible.

- Desarrollo de una tecnología para aliviar los conflictos del agua interregionales e incluso transfronterizos.

- Desarrollo de una actividad poco desarrollada en España y con escasez de empresas que lleven a cabo actividades similares, con altas probabilidades de éxito comercial, al tener una fuerte justificación socio-económica, estratégica y política.

- Coincidencia de los objetivos del proyecto con los objetivos medioambientales y la política de calidad de las empresas promotoras (Grupo Tragsa).

Objetivos específicos del proyecto

Objetivos técnicos por fases:

Hito 1: Análisis de resultados, nuevas etapas de investigación y planteamiento de alternativas:

- Análisis de los nuevos datos obtenidos en las "zonas piloto" (seguimiento de la instrumentación, toma de datos de piezometría y calidad de las aguas y/o recopilación de nuevos datos publicados por otros organismos colaboradores; e interpretación de los mismos).

- Generación de cartografías temáticas específicas compatibles con el formato del inminente "Hidrogeoportal" (hito tres).

- Nuevos estudios de las alternativas para implantar dispositivos de recarga artificial de acuíferos en las zonas MAR. Diseño de nuevos dispositivos acordes a la realidad física de cada emplazamiento, no solo de infiltración, si no también de limpieza y mantenimiento, de modo que la vida del producto se vea incrementada y

los costes abaratados siempre que sea posible. Selección de los dispositivos más adecuados para cada "zona MAR". Presentación de opciones. Posibilidad de emplear nuevos materiales.

- Estudio de técnicas de Tratamiento de Suelo y Acuífero (SAT) para las nuevas instalaciones probadas en las zonas piloto.

Hito 2: Aspectos medioambientales:

- Desarrollo y/o adaptación de los dispositivos de AR ya existentes a las circunstancias de nuestro país.

- Definición de los niveles de alerta (profundidad del nivel del agua máxima para la recarga artificial) en los acuíferos que engloban las áreas piloto.

- Aplicación y definición de caudales ecológicos de los cauces de toma para ensayar la metodología diseñada.

- Estudio de posibilidades de regeneración de humedales y otros medios vulnerables, tales como manantiales, sistemas dunares, etc. aplicando la técnica MAR.

- Realización de ensayos *in situ* y toma de muestras en los humedales de la Cubeta de Santiuste (Complejo de humedales de Coca-Olmedo) monitorizados por el equipo investigador desde antes del inicio del proyecto.

- Redefinición de los indicadores medioambientales diseñados que incorporen los aspectos sociológicos, socio-económicos y políticos.

- Adaptación de la experiencia en zonas piloto al diseño arquitectónico de parques, jardines y zonas urbanas, así como edificios tipo "centros de interpretación", generando criterios de SUDS (Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible) que incrementen el grado de conocimiento de la hidrogeología urbana.

Hito 3: Educación ambiental/Divulgación:

- Definición de nuevas áreas susceptibles para la aplicación de las técnicas y metodologías a tenor de los resultados de los hitos anteriores en todo el territorio nacional (excluyendo las Islas Canarias).

- Nueva carga en GIS y elaboración de cartografías temáticas específicas, adaptadas al objetivo de divulgación y al formato del Hidrogeoportal.

- Divulgación mediante cursos, conferencias, publicaciones, actualización permanente de la página Web (www.dina-mar.es), etc.

- Generación de nuevos materiales de educación ambiental y transferencia de tecnología (dípticos divulgativos, libros, senderos ecológicos (rutas hidrogeológicas), instalación de paneles en campo, etc.).

- Adaptación de la aplicación GIS “llave en mano” y de la información obtenida en una nueva aplicación abierta que englobe todas las fases seguidas hasta la determinación y definición de las áreas susceptibles, que permita acceder a la información generada mediante la creación del hidrogeoportal DINA-MAR.

Hito 4: Comercialización:

- Adaptación del conocimiento adquirido al marco relativo a la gestión hídrica y medioambiental nacional.

- Identificación de las nuevas líneas de trabajo que puedan surgir a partir de la experiencia adquirida, así como las nuevas posibilidades de cooperación con organismos e instituciones asociadas a este ámbito, como Universidades, Confederaciones Hidrográficas, empresas del sector, centros de investigación nacionales y extranjeros, etc.

- Técnicas para la reducción de costes de obra.

CAPÍTULO 1. CONTEXTUALIZACIÓN

MARCO LEGAL

La necesidad del proyecto está suficientemente justificada por el contexto sociopolítico del estado español en la actualidad en materia de aguas. Los viejos esquemas de gestión están viendo la incorporación de nuevas técnicas "alternativas" o "especiales" que permitan salvaguardar garantías de suministro en periodos de sequía y en zonas que sufren escasez de recursos hídricos.

Estas técnicas tienen cabida en respuesta a los objetivos prioritarios marcados por la política hidráulica del gobierno actual, basada en gran medida en la desalación, reciclaje y reutilización (la recarga artificial de acuíferos queda integrada en el grupo de acciones "reutilización"). Al mismo tiempo encajan plenamente con los objetivos del milenio de la ONU (UN MDG).

El análisis de la legislación relacionada se ha llevado a cabo por el coordinador del proyecto con la ayuda desinteresada de Mónica Sastre, profesora asociada en derecho de la Universidad Rey Juan Carlos.

A modo de análisis legal, se ha realizado un *análisis léxico-gráfico*, con objeto de comprobar qué grado de atención recibe la técnica en la legislación, apreciando que el término "recarga artificial" y "zonas húmedas/humedal" apenas aparece en las principales disposiciones legales.

En el Plan Nacional de Regadíos (PNR) no hay alusiones; en la Ley 6/2001, de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) contempla 2 veces la "*recarga de acuíferos superficiales o profundos*" y 8 veces el término "humedal"; el RD 606/2003, del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH) menciona el término recarga artificial 1 vez; la Ley de Aguas (LA) 28/85 menciona la recarga artificial una vez y las zonas húmedas 6 veces; la *nueva LA* 46/1999, menciona recarga artificial 1 vez, zonas húmedas 2 veces y humedal 0 veces, la *DM* 2000/60/CE, cita 3 veces la palabra recarga artificial y 4 veces la palabra humedal; el Plan hidrológico Nacional (PHN), Ley 10/2001, (derogada recientemente), no menciona la recarga artificial salvo en los listados de inversiones, el término humedal aparece 5 veces y zonas húmedas 0 veces; el Plan Hidrológico de la Cuenca del Duero (PHD), RD 1664/98 tiene tres citas al término *AR*, y 8 alusiones en tablas de inversiones, siendo la disposición con mayor densidad del término "recarga artificial" por número de páginas en su articulado, consideradas "*técnicas especiales*", seguido de la Directiva Marco (DM). El PHD representa además el Plan Hidrológico de Cuenca que más atención dedica a la AR, seguido del de la cuenca del Ebro.

Como hito destacable en la regulación de la técnica MAR en España, cabe destacar la implantación cada día mayor de los estándares de calidad y metas que se establecen en el RD 1620/2007 de reutilización, en el que, por primera vez en la historia del país, se fijan objetivos de calidad (siete parámetros) de las aguas para la recarga artificial de acuíferos, desglosando además dispositivos superficiales e "inyección profunda".

A las disposiciones de este Real Decreto cabe añadir nuevos imperativos legales también relativos a parámetros cualitativos, como es el nuevo Real Decreto 1514/2009, de 2 de octubre, por el que se regula la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro.

A pesar de la promulgación de estas nuevas disposiciones legales, se hace necesario aprobar un RD específico4 para es establecer una regulación unitaria y específica de "la recarga artificial de acuíferos" donde se contemple: su definición, métodos de recarga, calidad del agua a introducir en el acuífero, autorización para recargar y títulos habilitantes para su posterior utilización por el titular del agua recargada o por un tercero. También se echa en falta una definición homogénea sobre qué se entiende, comprendido dentro del concepto recarga artificial de acuíferos, qué tipos de recarga existen y el know how para alcanzar los estándares de calidad exigidos en el RD 1620/2007.

Las actuaciones propuestas por DINA-MAR encajan con el marco legal vigente en la actualidad, además de cubrir algunos de los objetivos establecidos en la Directiva Marco de las Aguas 2000/60/CE (Directiva Marco o DM), en la Directiva 118/2006/CE del Parlamento y del Consejo sobre la protección de las aguas subterráneas frente a la contaminación, en el RD 1620/2007 ya mencionado y la actualización del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RD 9/2008, RDPH) emanado de la Directiva 2007/60/CE.

El nuevo Plan Nacional de Calidad de las Aguas 2007-2015 representa otro marco idóneo para adscribir este proyecto de investigación a la consecución del "Buen estado de las Aguas" por el que aboga la DM, por el programa A.G.U.A., el INGENIO 2010 y el Plan Nacional de I+D+i 2008-2011.

En definitiva, el desarrollo del programa propuesto representa una alternativa a incorporar en los sistemas de gestión hídrica tradicionales y su aplicabilidad encaja en varios ámbitos geográficos, especialmente de la "España Seca", lo que conlleva la necesidad de ampliar el inventario de dispositivos operativos a nivel español.

Además, crece la necesidad de diseñar técnicas y dispositivos específicos en función de las características de cada tipo de acuífero y para cada contexto, y el establecimiento y seguimiento de zonas piloto donde se están llevando a cabo ensayos hidráulicos con instrumentación. También la firma de nuevos convenios de colaboración para el intercambio de información y tecnología, que permitan incorporan la componente de investigación necesaria para un proyecto práctico y de carácter aplicado, como es este, cuya ejecución revierte en la consolidación del Grupo Tragsa como medio propio de la Administración, consolidar su carácter estratégico y abrir nuevas líneas de acción en materia de gestión hídrica en España, con altas posibilidades de acción transfronteriza y una proyección cada vez más internacional de DINA-MAR.

[4] El acudir a un Real Decreto para regular al recarga artificial de acuíferos resulta un procedimiento más ágil que a través del largo proceso de tramitación parlamentaria de los Proyectos de Ley, y se adapta mejor al contenido detallado de la materia. Por lo demás, el Real Decreto, al tener rango de norma reglamentaria, es fácilmente revocable mediante su derogación, modificación o sustitución.

En conclusión, se ha detectado que las consideraciones hacia la recarga artificial AR y la conservación de las zonas húmedas son escasas, si bien queda bien definido el escenario de actuación. También se aclara que la recarga artificial es un vertido, en sentido amplio.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE Y NUEVAS APORTACIONES

INVENTARIO ACTUALIZADO DE EXPERIENCIAS DE GESTIÓN DE LA RECARGA EN ESPAÑA. Por Enrique Fernández Escalante, Mª Jesús Minaya Ovejero y Miriam W. Senent del Álamo.

INTRODUCCIÓN

En España ha habido varias experiencias de gestión de la recarga o recarga artificial de acuíferos, a pesar de ello, su implantación está siendo un poco lenta y limitada con respecto a otros países.

A continuación y como contribución al estado del arte, se describen la mayor parte de las experiencias que se han llevado a cabo, las experiencias que actualmente están en funcionamiento y los proyectos que se van a realizar a los que ha tenido acceso DINA-MAR.

A pesar de que se ha hecho un gran esfuerzo por realizar un inventario lo más exhaustivo posible, es previsible que haya varios dispositivos y experiencias de las que no tengamos constancia.

ANTECEDENTES Y EXPERIENCIAS PREVIAS

Los resultados del inventario se presentarán desglosados por las comunidades autónomas en que se ubican.

La Rioja

RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO ALUVIAL DEL RÍO OJA

Esta experiencia de recarga artificial tuvo lugar en el acuífero aluvial del río Oja cuyo cauce discurre por La Comunidad Autónoma de La Rioja, tal como su nombre indica. Concretamente, la Unidad Hidrogeológica Nº 403: Aluvial del Oja o Glera es un acuífero libre formado por terrazas que con el tiempo ha ido creando el río, aunque el principal acuífero es el que está formado por las terrazas bajas y el aluvial del Oja, mientras que las terrazas superiores están desconectadas hidráulicamente. Este acuífero presenta espesores de gravas y arenas entre 4.5 y 20 m con una permeabilidad muy alta y la velocidad del flujo oscila entre 200 y 400 m/día.

Esta experiencia tuvo una duración que fue desde diciembre de 1986 hasta 1988.
Los dispositivos instalados consistieron en tres balsas de infiltración con un área de 5.320 m^2 y una serie de canales cuya longitud alcanzaban los 10 Km. La respuesta a la recarga artificial por parte del acuífero fue muy rápida tal como se pudo observar en los diferentes piezómetros instalados.

El agua que se utilizó para la recarga fue la aportada por los excedentes invernales del río Oja cuya calidad era muy buena (mineralización baja y una cantidad en sólidos en suspensión menor a 10 mg/l). Sin embargo, este valor de la cantidad en sólidos en suspensión no impidió que en el tercer año de la recarga se produjeran efectos de colmatación que disminuyó la tasa de infiltración. Los resultados no fueron lo suficientemente satisfactorios para que se continuase con el proceso de la recarga artificial aunque los responsables de este proyecto decidieron aprovechar los dispositivos instalados para obtener una mejora de la calidad del agua.

Castilla y León

RECARGA ARTIFICIAL EN EL VALLE DEL ESGUEVA, VALLADOLID

Esta actuación se llevo a cabo en el acuífero detrítico profundo que se encuentra en el Valle del río Esgueva y que está aislado de los acuíferos superiores.

El motivo de esta experiencia realizada durante los años 1984-1987 fue el intento de reducir la sobreexplotación producida por los bombeos de los regantes de la zona.

La prueba de la recarga artificial se llevó a cabo en un sondeo profundo perforado por el antiguo Instituto Nacional de Colonización en Esguevillas de Esgueva. Este dispositivo captaba el agua por bombeo desde un punto del río Esgueva situado a 300 m del propio sondeo. La instalación constaba de una cuba de hierro de 5 m de largo por 1 m de altura en el que en el fondo había un filtro tipo puentecillo y el espacio restante estaba ocupado por grava silícea de 3-5 mm. El objetivo de este dispositivo era regular el caudal, filtrar y reducir la cantidad de sólidos en suspensión que hubiera en el agua.

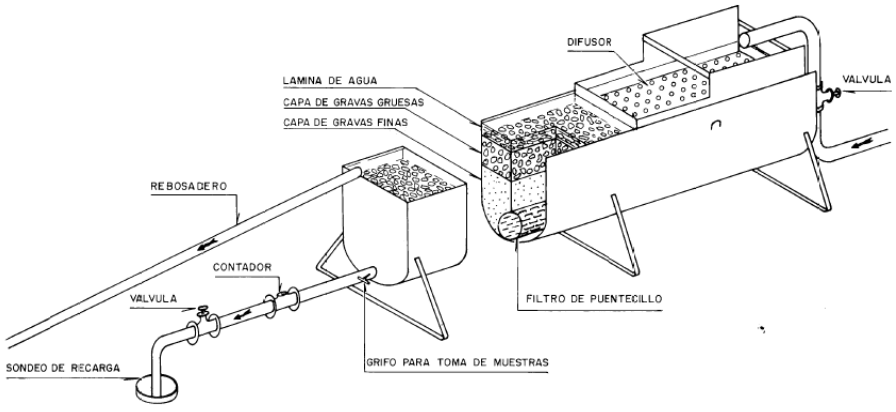


Figura 1-01. Esquema del dispositivo de recarga. Tomado de IGME, 1984

Para evitar la caída libre del agua, la tubería descargaba el agua por debajo del nivel freático y así se disminuía la cantidad de oxígeno disuelto que se introducía en el acuífero.

Los resultados de la recarga artificial profunda fueron favorables, por lo que se desarrollo un modelo matemático en el que se consideró la utilización de 15 sondeos con un caudal de inyección de 20 l/s por sondeo para contrarrestar los descensos de los niveles piezométricos.

Las razones por las que se abandono este proyecto fue la falta de una financiación para su continuación.

Islas Baleares

RECARGA ARTIFICIAL EN EL LLANO DE PALMA, EN LA ISLA DE MALLORCA

En la unidad hidrogeológica del Llano de Palma se distinguen dos acuíferos:

- El acuífero superior pliocuaternario superficial que está formado por dunas, arenas, gravas, limos y calcarenitas y a cuyo muro se encuentran unas margas pliocénicas. Es un acuífero libre con un espesor medio de unos 40 m cuyas transmisividades varían entre los 150 a los 5000 m^2/día dependiendo de la zona y su coeficiente de almacenamiento está entre 0,01 y 0,03.
- El acuífero inferior es del mioceno profundo y está constituido por calizas messinienses y calcarenitas del Tortoniense-Messiniense. Las primeras presentan trasmisividades entre 500 y 2.500 m^2/día mientras que las segundas tienen un rango de valores entre 200 y 1000 m^2/día. Por otro lado, el coeficiente de almacenamiento varía entre 0,001 y 0,04. Hay zonas en la unidad hidrogeológica de Llano de Palma en donde los dos acuíferos están conectados hidráulicamente.

Tras haber analizado los dos acuíferos, es momento de mencionar los problemas que sufren. El aumento de población, la necesidad de riego para regadío y el “boom” del turismo a partir de los años 60 generó una sobreexplotación de los Llanos de Palma provocando la contaminación por intrusión marina.

Esto llevó a realizar en 1976 la recarga artificial del acuífero con los excedentes de las aguas tratadas en la planta de de tratamiento de aguas residuales de San Jordi, cuya producción total se destinaba al regadío.

El dispositivo de recarga artificial consistió en inyectar esta agua a través de 7 pozos en el acuífero. Sin embargo, a partir de 1987 este procedimiento se dejó de efectuar debido al aumento de la extensión del regadío, aunque se decidió conservar los dos sondeos para una posible recarga futura mediante excedentes.

Comunidad Valenciana

RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO DE JAVEA, ALICANTE

El acuífero detrítico aluvial de Javea es un acuífero libre del Cuaternario formado por arenas, gravas y limos procedentes del río Gorgos. En cuanto a sus parámetros

hidrogeológicos, este acuífero presenta un rango de transmisividades que varía entre los 750 y los 7.500 m^2/día.

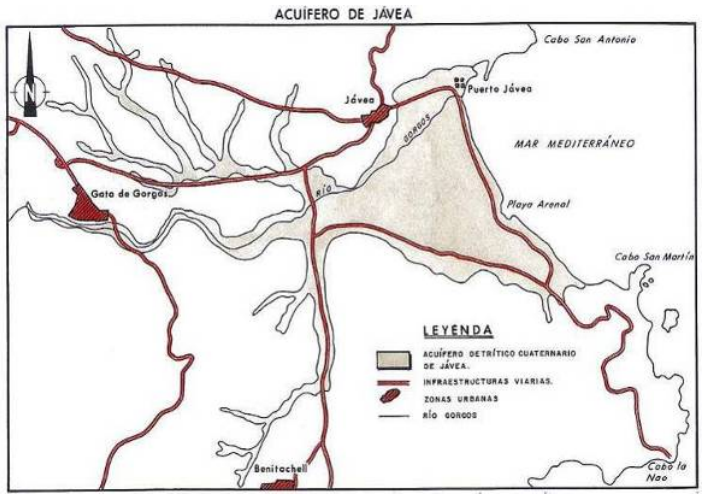


Figura1-02. Cartografía esquemática del acuífero de Jávea, donde hay operaciones de recarga artificial asociadas al caudal circulante por el río Gorgos. Tomado de IGME-DPA, 1999.

Como en muchos acuíferos de la costa de Alicante, el aumento de la población que se generó durante los años 70 y 80, el regadío y la climatología árida mediterránea provocó la sobreexplotación y la intrusión marina en el acuífero. Por ello, en los años 90, los regantes de la zona llevaron a cabo una experiencia de recarga artificial.

Esta actuación consistió en 8 zanjas transversales al cauce del río cuyas profundidades estaban alrededor de los 3 ó 4 m, con un ancho de aproximadamente de 1,5 m y una longitud de 8 m. Las zanjas fueron rellenadas de bloques de caliza. Al principio, el funcionamiento de este sistema de recarga artificial fue bueno, pero más tarde estas zanjas sufrieron procesos de colmatación debido al relleno de los poros por los finos transportados por el propio río, efecto que se hubiera solucionado con un mantenimiento de limpieza del dispositivo de recarga.

La ubicación aproximada de las zanjas filtrantes, con coordenadas obtenidas con GPS monofrecuencia, es:

Nº	Fecha	Huso	X	Y
Javea	02-02-07	31	252.197	4.295.698

Tabla 1-01. Ubicación de las zanjas filtrantes situadas en la Plana de Javea.

Figura 1-03. Zanja filtrante para la recarga artificial del acuífero. Tomado de IGME, 2000.

Figuras 1-04 a) y b). Aspecto de dos zanjas filtrantes con diques de contención construidos por los propios agricultores en el cauce del río Gorgos en Javea para incrementar la recarga artificial del acuífero por el lecho del río.

Además, el dispositivo resultaría más efectivo en el caso de contar con un filtro de arena o gravilla superficial que fuera reemplazado periódicamente. En este caso resulta especialmente dificultoso incidir sobre la calidad de las aguas de recarga, al ser las del mismo río, por lo que no parece viable el pretratamiento.

El lecho del río nunca ha sido escarificado, técnica empleada en Barcelona desde hace varios años, que permitiría un incremento del volumen infiltrado, siempre y cuando la escarificación se produjera a velocidad inferior a la de la corriente, con objeto de que sean evacuados todos los finos puestos en suspensión. Esta alternativa podría tener un impacto ambiental negativo en la vegetación acuática y fauna piscícola no evaluado.

La construcción de un dique de fondo permeable aumentaría la efectividad del dispositivo actual, siempre y cuando contara con labores de mantenimiento. Estas pueden ser llevadas a cabo con facilidad en el periodo estival, en el que el río se seca la mayor parte de los años.

Estudios posteriores llegaron a la conclusión que la recarga artificial generada por estos dispositivos fue mínima comparada con los recursos propios del acuífero.

Andalucía

RECARGA ARTIFICIAL EN ALCALÁ LA REAL, JAÉN

Esta experiencia de recarga artificial fue realizada en el acuífero conocido como Los Llanos cuya extensión es de 6.6 km^2 y está formado por calcarenitas bioclásticas del Mioceno, con espesores entre 50 a 60 m y cuyo .muro está formado por margas también miocénicas.

Este acuífero se caracteriza por presentar transmisividades con valores que varían desde los 4 m^2/día a los 500 m^2/día mientras que la porosidad eficaz está entorno al 2.3% y la calidad del agua subterránea es buena (facies bicarbonatadas cálcica, conductividades con valores inferiores a los 500 µS/cm y los contenidos en nitratos están comprendidos entre 20 y 30 mg/l).

El dispositivo de recarga artificial consistió en el uso de dos de las tres balsas de infiltración previamente construidas por el ayuntamiento de Alcalá la Real, y de dos sondeos por los que se procedía a la recarga artificial del agua procedente del sondeo El Chaparral, también situado en el municipio de Alcalá la Real, pero en otra unidad hidrogeológica.

Los ensayos de viabilidad fueron realizados durante un periodo de 66 días con unos caudales medios de 10,3 l/s.

Los resultados obtenidos fueron favorables y se llego a considerar la posibilidad de redimensionar las balsas para adecuarlas a los caudales que se pretenderían utilizar para la recarga artificial. Lamentablemente, esta experiencia no tuvo continuidad.

RECARGA ARTIFICIAL EN MANCHA EL REAL, JAÉN

Mancha el Real se encuentra ubicado en el acuífero miocénico Intermedio de Mancha Real con una extensión de 0,85 km^2. Está formado por calizas con espesores que varían entre 100 y 400 m recubiertas por depósitos detríticos pliocuaternarios. A muro del acuífero y también lateralmente hay margas que conforman los límites del acuífero.

Este acuífero tiene grandes variaciones de su transmisividad dependiendo de la zona por donde circule el agua. Estos valores varían entre 100 a 1000 m^2/día mientras que los valores de porosidad eficaz varían entre 0,2-5 %.

Hablando del tema que nos interesa, en esta zona se ha llevado a cabo dos ensayos para la viabilidad de la recarga artificial. Para ello, el IGME utilizó dos sondeos perforados y abandonados como método de inyección del agua de recarga en el acuífero (Sondeos Barrena I y II).

El primero de ellos se realizó durante dos días del año 1991. La primera prueba fue efectuada el 10 de mayo durante 8 horas con un caudal de inyección que estaba entre los 34 y los 67 l/s, mientras que la segunda prueba fue realizada el 15 de mayo durante 7 horas y con un caudal medio de 67 l/s.

El segundo de estos ensayos comenzó el 22 de diciembre de 1999 y finalizó el 16 de enero del 2000 por avería del sistema. Sin embargo, se volvió a hacer otras dos pruebas, una del 24 al 27 de enero y la otra del 18 al 20 de febrero. El caudal medio para la recarga artificial estaba en torno a los 8,35 l/s y se obtuvo 20.900 m^3 de agua recargada durante los 29 días de funcionamiento y un ascenso del nivel piezométrico de 2,61 m.

Los resultados obtenidos fueron favorables, pero esta experiencia no tuvo continuidad en el tiempo por que el regadío del olivar recibía todos los excedentes de las aguas superficiales. Esto hizo que la comunidad de regantes instalará unas balsas para almacenar esta agua. De esta manera, el acuífero dejó de ser explotado y volvió a alcanzar sus niveles piezométricos iniciales.

Sin embargo, a partir del año 2000 se precisó volver a explotar el acuífero pero sólo extrayendo un volumen similar al de la recarga natural del acuífero.

DEPURACIÓN EN LAS DEHESAS DE GUADIX, GRANADA

Esta experiencia se llevo a cabo en 1999 y se localizó en el término municipal de Las dehesas de Guadix, Granada.

La construcción del dispositivo fue financiado parcialmente por el proyecto de investigación HID96-1326 “Recarga artificial de acuíferos: evaluación, análisis y seguimiento de condicionantes técnicos y económicos. Sistema de tratamiento de aguas residuales urbanas mediante infiltración directa sobre el terreno. Experiencia en Dehesas de Guadix (Granada)” y fue el propio ITGE el que diseñó y construyó estas instalaciones.

Concretamente, esta “planta” de depuración se encuentra sobre el acuífero aluvial detrítico libre del río Guadahortuna en cuya base se encuentran las margas del Tortoniense (ITGE 1997).

El dispositivo de depuración consta de tres sistemas:

- El primer sistema consiste en un tratamiento previo en el que se realiza los procesos de desarenar y desengrasar el agua para posteriormente, ser almacenada en una balsa de 50 m^3. Luego el agua es decantada en otra balsa de las mismas dimensiones. Durante toda esta sucesión de procesos se consiguió eliminar el 75% de los sólidos en suspensión. Para mantener la funcionalidad de las balsas se utilizó un filtro verde para limpiarlas. Antes de pasar al segundo sistema, el agua circula por una arqueta en la que hay un caudalímetro y un turbidímetro.

- El segundo sistema está formado por dos balsas de filtración cuya distribución del agua junto a los periodos de humectación-desecación se realizaba mediante válvulas. La circulación del agua se debe al efecto de la gravedad.

- Como tercer sistema, se instaló unos dispositivos de vigilancia y control que consisten en cinco sondeos piezométricos entubados en PVC de 90 mm de

diámetro ranurados a partir de los 10 m de profundidad, dos lisímetros equipados con drenes horizontales situados en el centro de las balsas de infiltración. Los lisímetros tienen 1,5 m de diámetro y 3 m de profundidad con seis taladros horizontales, uno cada 50 cm. Por último se realizó tomas de muestras del lecho filtrante cada tres meses y toma de muestras del agua cada 15 días.

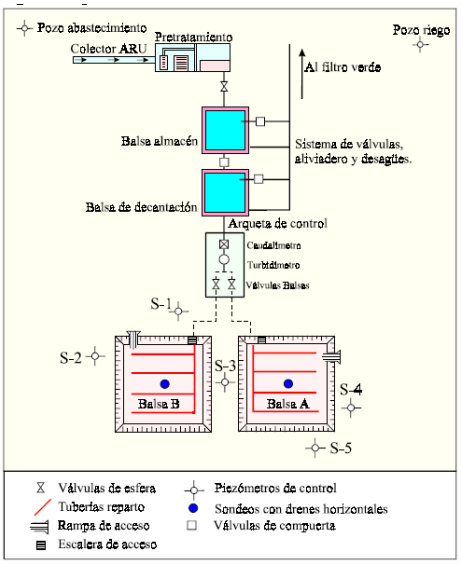


Figura 1-04. Esquema de los dispositivos de depuración Tomado de IGME, 2001.

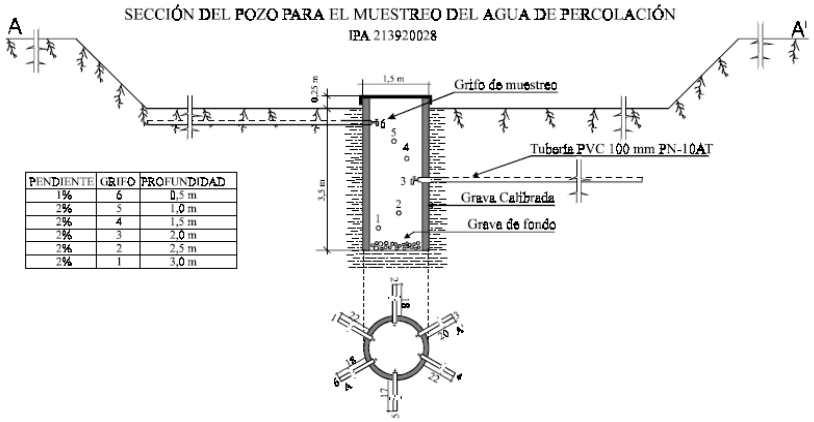


Figura 1-05. Esquema de construcción de los pozos con drenes horizontales. Tomado de IGME, 2001.

Tras las pruebas realizadas, el resultado obtenido fue muy favorable, obteniéndose altas tasas de depuración. Este método de depuración y recarga artificial continua en estudio.

RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO DE GRACIA-MORENITA, JAÉN

El material permeable por el que está formado el acuífero de Gracia-Morenita es de naturaleza calizo (calizas y dolomías jurásicas) con espesores comprendidos entre 150 y 300 m.

Presenta una afloración de 19 km^2 y por lo tanto, en la mayoría de su extensión es un acuífero libre aunque se localizan zonas confinadas por margocalizas cretácicas. El muro impermeable está constituido por lutitas triásicas.

Entre los parámetros hidrogeológicos que conforman este acuífero hay transmisividades de 1.500 m^2/día en los sectores libres y de 300 m^2/día en los confinados. El coeficiente de almacenamiento varía en las zonas confinadas entre 3,3 y 4,2x 10^{-5}, mientras que en el acuífero libre su medida ha sido de 1,5 x 10^{-2}.

La importancia de este acuífero radica en que sus aportaciones van a parar al río San Juan, por lo que se planteo la recarga artificial como medida paliativa para las excesivas extracciones que se dan en el sistema Quiebrajanos-Víboras.

El ensayo de esta recarga artificial realizada en el año 2000, se llevó a cabo con aguas del Arroyo del Papel que fueron derivadas a un depósito. Posteriormente estas aguas eran introducidas en el acuífero mediante un sondeo (Víboras II) con un caudal de 19 l/s durante un periodo de 43 días. A partir de este ensayo se calculó que durante un periodo de 13 años con un bombeo de 100 l/s se provocaría un descenso de la descarga natural de un 28%.

Sin embargo, si esta extracción se combinase con una recarga artificial con un caudal aportado de 50 l/s, el valor de la descarga natural se reduciría a un 2,3%.

El sistema de recarga final consistiría en dos sondeos de explotación (Víboras IV y VI) y otros dos sondeos cuya misión sería la recarga artificial del acuífero (Víboras II y V).

RECARGA ARTIFICIAL CON AGUA DE DRENAJE DE LA MINA DE HIERRO DE ALQUIFE, GRANADA

En la corta minera de Alquife se explotaba una paragénesis mineral de varias menas de hierro. Este yacimiento estaba encajado en una formación marmórea conocida como Complejo Nevado-Filábride.

La mina se encuentra situada en la Unidad Hidrogeológica 05.12 Guadix-Marquesado que se compone por varios acuíferos interconectados entre ellos, los cuales se exponen a continuación:

La formación Guadix es detrítica y está formada por conglomerados, arenas y lutitas de espesores de varios centenares de metros. Debido a las litologías que presenta, esta formación es un acuífero heterogéneo y por lo tanto tiene una gran variabilidad de permeabilidad y transmisividades con valores que oscilan entre 80 y 800 m^2/d (ITGE - Junta de Andalucía, 1998).

A techo de la formación anterior se encuentran en discordancia los depósitos formados por la actual red fluvial que consisten en ramblas, recubrimientos aluviales y coluviones de naturaleza detrítica (conglomerados, gravas y arcillas).Su permeabilidad oscila entre 10 y 40 m/día (ITGE - CHG, 1996).

Por último, en el sector sur y a muro de la formación Guadix se encuentra un acuífero formado por los mármoles del complejo Nevado-Filábride. Este acuífero presenta una gran permeabilidad debido a la intensa fracturación y disolución que sufre (50 a 100 m/día). Su potencia puede llegar en algunas zonas a alcanzar los 300 m. En esta zona es donde está situada la Mina de El Marquesado (Alquife).

Para llevar a cabo la explotación se realizó el desmonte de todo el recubrimiento que constituía el principal acuífero de la zona y hubo que deprimir el nivel freático mediante bombeo para evitar la filtración de agua a la corta.

Este drenaje se realizaba mediante tres dispositivos:

- Sondeos en el acuífero para permitir la expansión de la corta minera y garantizar la estabilidad de los taludes.
- Sondeos dentro de la propia corta para poder realizar los procesos de explotación en seco.
- Sondeos de agotamiento que deprimían el nivel freático al nivel de agua de los mármoles.

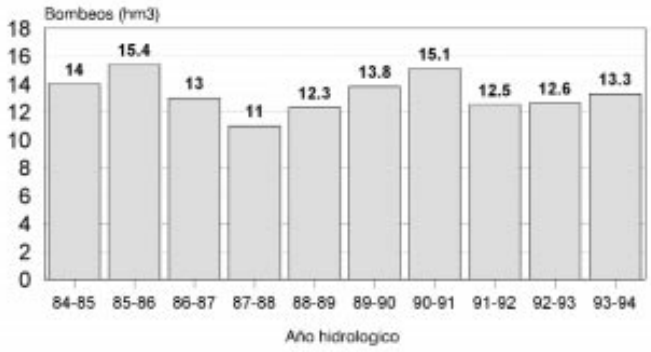


Figura 1-06. Caudales bombeados por la mina de Alquife Tomado de De la Orden et al, 2001.

En cuanto a la instalación de los dispositivos de recarga artificial se decidió situarlos en la zona de alimentación del acuífero, aguas arriba de la zona regable. Estos dispositivos consistieron en balsas de infiltración cuyas coordenadas son las siguientes:

X	Y
490.625	4.120.950
490.762	4.121.579
490.612	4.121.076
490.299	4.120.611
490.152	4.120.464
490.145	4.120.335
489.956	4.119.964
489.833	4.119.740

Tabla 1-02. Coordenadas UTM de los dispositivos de recarga artificial de Alquife

El agua que se utilizó para la recarga artificial procedía de la Mina de El Marquesado y era extraída por la serie de sondeos ya descritos.

La calidad de esta agua subterránea (procedente del acuífero carbonatado) es muy buena siendo agua bicarbonatada cálcico-magnésica con baja concentración salina, con bajas concentraciones de flora bacteriana y temperatura constante de unos 15ºC. Por lo tanto este proceso de recarga artificial no tenía previsto tener problemas de colmatación.

El primer ciclo de la recarga artificial se realizó de diciembre de 1984 a febrero de 1985 y se llevó a cabo en tres balsas con una capacidad de 18.400 m^3.

Durante ese periodo se llegó a recargar 1,1 hm^3 con un caudal de 205 l/s, produciendo un domo piezométrico asimétrico en el acuífero con un ascenso medio de 1,7 m. Al final de esta experiencia se constató que la capacidad de infiltración estuvo cerca de 3m^3/día.

Durante los dos siguientes ciclos (85-86 y 86-87) se continuo la recarga artificial con un caudal de 90 l/s y se obtuvo resultados similares al 1º ciclo.

El último ciclo de recarga artificial fue de diciembre de 1988 a marzo de 1989. Para estos cuatro meses de recarga artificial se construyeron otras tres balsas que aumentó la superficie de infiltración a unos 11.550 m^2 con un volumen máximo de 35.100 m^3. A pesar de esta mejora, los caudales suministrados fueron muy irregulares y por lo tanto la infiltración no fue constante (entre 60-170 l/s).

El control de los volúmenes infiltrados se llevó a cabo estudiando las variaciones de altura de la lámina de agua embalsada. Se construyeron además nueve piezómetros de control generando una red de 14 puntos. Seis de ellos fueron instrumentados con limnígrafos de eje vertical para el registro del nivel freático en continuo.

El control de la piezometría permitió calcular la velocidad de propagación del domo, que oscilaba entre 50 y 75 m/día, siendo mayor en las inmediaciones de las balsas, con flujo anisótropo.

El bulbo de humidificación alcanzó la horizontalidad a unos 150 m de las balsas.

Figuras 1-07 a) a c). Aspecto de las balsas en 1998, en plena operatividad, y en octubre de 2006 tras varios años de abandono.

Figuras 1-08 a) y b). Aspecto de la instrumentación (limnígrafos) de los piezómetros de observación en octubre de 2006. Gran parte de ellos están inoperativos.

Tras estos años de experiencias de recarga artificial, no se volvió a proceder a la infiltración de agua drenada de la mina al acuífero por que esta explotación minera dejo de ser rentable a principios de los años 90.

A pesar de que el motivo de la inactividad de estos dispositivos de recarga artificial fue el cierre de la mina, se puede analizar varios problemas que presentaron estas actuaciones como la aireación de las aguas, introducción de burbujas en el acuífero y colmatación del fondo de las balsas.

Otros problemas que condicionan la efectividad del dispositivo se atribuyen a la presencia de carbono orgánico disuelto en las aguas, hierro y a la secuencia de flujo. La instalación de válvulas desaceleradoras intercaladas en la tubería, el uso de decantadores y la implantación de un sistema de gestión de tipo dual, coordinando el

funcionamiento y la limpieza de las seis balsas, incrementaría previsiblemente en gran medida la tasa de infiltración sin disparar los costes en inversiones.

En el caso que se obtuviera otra fuente de agua para la recarga artificial que la procedente del bombeo de la mina, las posibilidades de mejora de los dispositivos se basan principalmente en la morfología del sustrato de las balsas (caballones) y la adopción de técnicas de Tratamiento de Suelo y Acuífero (SAT) específicas, tales como el empleo del ciclo de helada para alterar los procesos colmatantes.

RECARGA ARTIFICIAL REALIZADA EN EL ACUÍFERO ALUVIAL DEL RÍO GUADALQUIVIR (CANAL BAJO)

El acuífero aluvial del río Guadalquivir es un acuífero detrítico de arenas, gravas y limos y en cuya base se encuentran la formación impermeable de las margas azules del Guadalquivir (Mioceno). Este acuífero se caracteriza por tener unas transmisividades del orden de 1.000 a 3.000 m^2/día y unos coeficientes de almacenamiento entre el 2 y el 8%.

La zona en cuestión presenta un gran uso de la agricultura, el cual se abastece del suministro de aguas superficiales. Sin embargo, en épocas de sequía se requiere la extracción de agua subterránea mediante pozos y por lo tanto, para asegurar dicho aporte se planteo la recarga artificial del acuífero. Los ensayos fueron realizados durante el año 1991.

Los dispositivos que se instalaron consistieron en una zanja de 500 m de longitud, 11,80 m de ancho y una profundidad de 5m y estaba rellena de gravas y arenas con sondeos en su interior.

Las coordenadas UTM de la cabecera del dispositivo, referidas al huso 30 son:

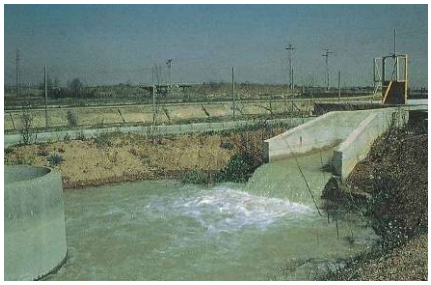
X. 262.962
Y. 4.163.060

Figura 1-09. Canal bajo del Guadalquivir y batería de 15 pozos de recarga artificial alineados. Escala 1:15.000.

El funcionamiento de este dispositivo consistía en la circulación de agua hacia una balsa de decantación mediante bombeo. Posteriormente el agua circulaba por la zanja

ya mencionada que actuaba como filtro hasta llegar a los sondeos por los cuales se recargaba artificialmente el acuífero. Se realizaron dos pruebas en el dispositivo. Una durante el mes de junio de 1993, que duró del orden de 10 días, y otra en marzo de 1994, que comenzó el día 10 y finalizó el día 25, quedando luego abandonado.

Figura 1-10. Dispositivo de toma de agua del canal. 26 de marzo de 2007.



Figuras 1-11 a) y b). Aspecto del dispositivo de AR en 1993.

Figuras 1-12 a) y b). Aspecto del dispositivo de AR tras años de abandono. Fecha: 26 de marzo de 2007.

Tras los ensayos realizados se observó que la respuesta del acuífero en las zonas más cercanas al dispositivo fue muy rápida, llegando a alcanzar subidas piezométricas de 3 ó 4 m, mientras que en las zonas que se encontraban un poco más lejos se cuantificó una subida media de 1,5 m (a 7-10 días del comienzo del experimento).

Con estos resultados se calculó que la velocidad del agua estaba entre 26-70 m/día por lo que se dedujo que la permanencia del agua recargada en el acuífero antes de llegar al río era 57-150 días.
Este dispositivo presentó un gran problema: la eliminación de los sólidos en suspensión. Se llegó a alcanzar valores de 250 mg/l de dicho parámetro, lo que disminuyó la capacidad filtrante de la zanja y por lo tanto también la recarga artificial.

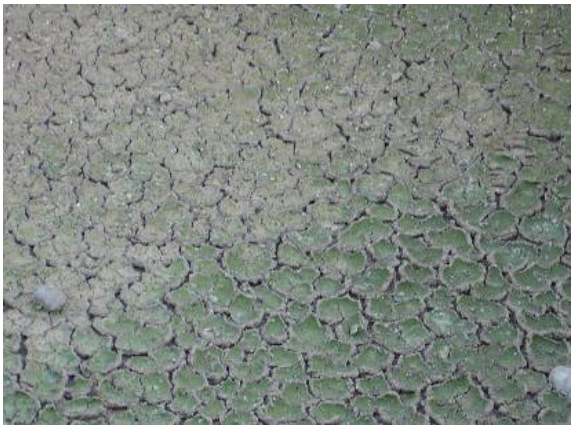


Figura 1-13. Procesos colmatantes en el lecho del dispositivo. Conducción principal.

A pesar de su corta vida, las instalaciones podrían ser recuperadas con relativa facilidad. En caso de hacerlo, sería conveniente no dejar caer el agua por gravedad en el interior de los pozos, y evitar su aireación y oxigenación, de cara a minimizar el efecto *Lisse*.

Su cercanía al canal recomienda la construcción de nuevos pozos más alejados que permitan recargar otros sectores del acuífero.

La presencia del dispositivo, aunque se encuentre en desuso, hace recomendable mantener esta experiencia en el inventario realizado, por su facilidad de recuperación.

EXPERIENCIA DE RECARGA ARTIFICIAL REALIZADA EN LAS “CALCARENITAS DE CARMONA”, SEVILLA

El acuífero de las Calcarenitas de Carmona, perteneciente al Sistema Acuífero 28 “Sevilla-Carmona” (Unidad Hidrológica 05.47) consiste en un acuífero detrítico libre con un afloramiento de 150 km^2 que está conectado hidráulicamente a las terrazas del río Guadalquivir.

Concretamente, este acuífero presenta un espesor de unos 40 metros y a partir de esa profundidad se pueden encontrar las margas azules del Tortoniense.

Las aguas extraídas de dicho acuífero son duras, de composición bicarbonatada cálcica.

Los motivos que llevaron a realizar esta experiencia de recarga artificial del acuífero fue el aumento de los cultivos de regadío a pesar de la tradición de secano que había en la zona. Por ello, se generó un déficit hídrico de 9.5 hm^3/año que provocó importantes descensos piezométricos locales.

Para remediar esta situación, se planteó en 1991 una recarga artificial situada a 10 km de Sevilla y a 1 km del Canal del Bajo Guadalquivir cuyas aguas con valores medios de DBO_5 de 7 mg/l y de conductividad de 1.310 microhmios/cm, se utilizaron para este propósito.

Durante esta experiencia se llevaron a cabo 4 ensayos de recarga artificial, tres de ellos con dispositivos superficiales y el último mediante un pozo.

Los dispositivos superficiales consistían en una balsa de decantación y una de infiltración tipo fosa, mientras que para el profundo se construyó un pozo de 9,5 m de profundidad con un diámetro de 1,20 m y una superficie de infiltración de 28 m^2.

El agua obtenida mediante bombeo del canal Bajo del Guadalquivir se introducía en el acuífero por efecto de la gravedad.

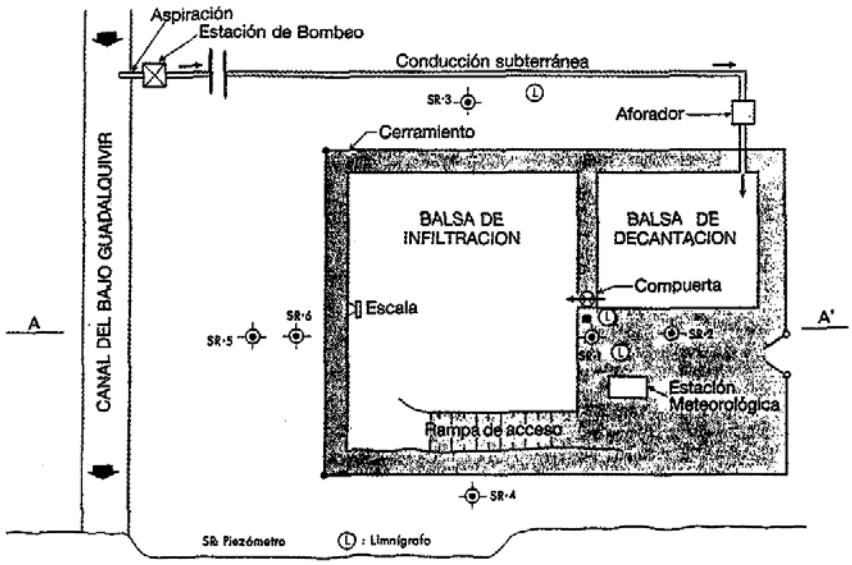


Figura 1-14. Esquema en planta de los dispositivos de recarga artificial. Tomado de López-Geta, 1994.

Los resultados obtenidos de estos ensayos fueron favorables pero se dedujo que se necesitaría una superficie de infiltración de 1,5 hectáreas para recargar el déficit hidráulico presente en la zona, siempre y cuando los dispositivos estuvieran funcionando durante unos cuatro meses.

Debido a falta de los aportes necesarios de aguas se abandonó el proyecto.

RECARGA ARTIFICIAL EN LEBRIJA Y EL CUERVO EN EL ALUVIAL DEL GUADALQUIVIR

El dispositivo de recarga artificial se encuentra localizado en el aluvial del río Guadalquivir.

El acuífero está formado por terrazas fluviales que varían según su edad, las más antiguas son del Cuaternario antiguo-medio y son conglomerados con matriz arcillo-arenosa y de menor espesor que las más jóvenes, que pertenecen al Cuaternario moderno y están formadas por gravas, cantos y arenas bajo una capa de limos arcillosos. El sustrato impermeable sobre el que se dispone el acuífero son unas margas de edad terciaria.

Se estima que la recarga natural es del orden 120 hm^3/ año mientras que las extracciones sonde unos 15 hm^3/año.

La calidad de las aguas es en general no apta para el consumo humano debido a sus altos contenidos en nitratos y nitritos generados por contaminación agrícola y urbana.

En cuanto a su utilización para regadío, en torno a la mitad de las aguas son buenas a mediocres y el resto suelen presentar problemas de alcalinización y salinización del suelo.

Figura 1-15. Aspecto general de las captaciones en Lebrija. Abundan los pozos de gran diámetro con el nivel freático a escasa profundidad.

Figuras 1-16 a) y b). Pozo de gran diámetro en Lebrija. El nivel freático se encuentra en torno a dos metros de profundidad, lo que dificulta las labores de recarga artificial. La otra captación corresponde a un minisondeo donde se realizaron ensayos de infiltración.

El dispositivo de recarga consiste en una serie de pozos y balsas que a continuación se exponen en unas tablas junto a sus coordenadas UTM:

Balsas:

NOMBRE	X	Y
B-6	228.854	4.084.877
B-1	229.183	4.088.727
B-2	229.878	4.090.218
B-4	233.375	4.084.422
B-10	236.390	4.089.623
B-3	236.560	4.090.769

Balsas con pozos de recarga:

NOMBRE	X	Y
PB-3	236.918	4.090.296
PB-9	236.099	4.089.572
PB-10	234.275	4.086.592
PB-8	233.439	4.084.519
PB-7	229.271	4.088.614

Pozos de recarga artificial:

NOMBRE	X	Y
S-6	230.394	4.083.616
S-5	227.438	4.090.594
S-3	229.481	4.090.210
S-4	228.760	4.088.892
S-11	226.611	4.092.391
S-2	230.154	4.082.629
S-1	231.557	4.082.782

Tras una visita se constató la inexistencia de dispositivos de recarga artificial en la actualidad en los siguientes puntos:

NOMBRE	X	Y
PB-3	236.918	4.090.296
PB-9	236.099	4.089.572
PB-10	234.275	4.086.592
PB-8	233.439	4.084.519
PB-7	229.271	4.088.614

Tablas 1-03. a) a d) Las tablas de a) a c) presentan las coordenadas donde se sitúan los dispositivos de recarga existentes. En d) se disponen los puntos donde no existían dispositivos de recarga.

A principios de los 90 se llevaron a cabo ensayos de infiltración, algunos de larga duración, y se perforaron varios pozos y piezómetros, si bien, en la actualidad o ha cambiado el uso o se han abandonado.

Según información verbal, en la zona de Lebrija hay problemas de salinidad, mientras que en el Cuervo no. Además cabe destacar que el nivel del agua se encontraba cercano a dos metros en varios de los pozos visitados, por tanto, las posibilidades de AR son escasas.

DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN MAZAGÓN, HUELVA

La depuración de aguas residuales de Mazagón fue realizada por el IGME en colaboración con el BRGM francés y fue el primer tratamiento de aguas de este tipo que se realizó en España. Tuvo una duración fue de 1 año.

Este proceso de depuración se basa principalmente en la infiltración directa. La zona de la experiencia está situada a 4 km. de Mazagón, en un pinar dónde se encuentran unas dunas litorales con espesores que alcanzan los 30 m y que tienen a muro unas margas impermeables. Estas dunas tuvieron la finalidad de actuar como lecho filtrante.

Los dispositivos que se instalaron para la depuración consistieron en un desbaste y desarenado con eliminación de flotantes, para que posteriormente el agua circulase con un caudal de 7 l/s a una balsa de decantación (17 m x 5 m x 2 m).

Tras el proceso de decantación, el agua se distribuía por efecto de la gravedad a seis balsas de infiltración mediante tuberías de PVC de 160 mm y válvulas manuales.

Para seguir el proceso de infiltración se instalaron en cada balsa un pozo de observación dotado de cinco puntos de control a diferentes profundidades (30, 60, 100, 150 y 200 cm). Además el agua subterránea se vigilaba a través de tres piezómetros cuya separación era de 50 m. Para que la funcionalidad de las balsas fuera efectiva, éstas tenían periodos de humectación y de desecación de 15 y 30 días respectivamente. Al final se obtuvo un caudal filtrado entre 1,2 y 2,4 l/s.

Los resultados fueron bastante buenos, reduciéndose al 90% la DQO a una profundidad de 2 metros mientras que la oxidación de amonio se redujo al 100%.

Sin embargo, la reducción de la cantidad de bacterias presentes en el agua no fue tan prometedora, ya que a esa misma profundidad se obtuvo que los coliformes totales disminuyeron en 1,2 unidades logarítmicas, 1,1 para los coliformes fecales y en 1,4 para los estreptococos fecales.

DISPOSITIVOS DE "RECARGA ARTIFICIAL" ACTUALES

Aragón

PRESA DE MULARROYA, AZUD DE DERIVACIÓN Y CONDUCCIÓN DE TRASVASE. INDUCCIÓN DE RECARGA ARTIFICIAL

El área donde se sitúa esta obra es la Unidad Hidrogeológica Nº 603 Campo Cariñena que se extiende al pie de la sierra de Algairén, por los llanos de Alfamén, entre los ríos Jalón y Huerva.

El acuífero en cuestión, que está en condición de sobreexplotación es el acuífero detrítico de Alfamén compuesto por arenas, limos y conglomerados y presenta un espesor de 500 m.

La sobreexplotación se debe a extracción masiva de agua para fines agrícolas (18 a 22 hm^3/año).

Además de lo ya mencionado, los motivos de la construcción de esta obra se deben a diversas problemáticas que se están dando en la zona de la Unidad Hidrográfica de Campo Cariñena como son:

- Falta de garantía en los suministros de riego en la zona media y baja del Jalón.
- Desprotección frente avenidas en el río Grío, aguas abajo de la partida de Mularroya.
- Falta de una caudal de mantenimiento en el río Grío, aguas abajo de la partida de Mularroya.

Por esto, con esta obra se pretende alcanzar un aumento de la regulación del río Jalón para asegurar el suministro de agua para riego, conseguir recursos para aumentar la superficie de riego en la zona media y baja del Jalón, contribuir a la recarga del acuífero de Alfamén aumentando el nivel piezométrico de la Unidad Hidrogeológica de Campo Cariñena, laminar avenidas en el río Grío aguas abajo de la partida de Mularroya y asegurar un caudal de mantenimiento del río de acuerdo a su régimen estacional.

Aunque la presencia de la presa no genera una disminución de vertidos, se producirá una mejora de la calidad de las aguas debido a la dilución de la carga contaminante en un mayor volumen de agua.

Esta obra regulará los caudales generados por una cuenca de 7.008 km^2, con una aportación media anual de 315,57 hm^3 que se traduce en un caudal medio de 10,01 m^3/s.

El volumen medio anual trasvasado rondará los 58,76 hm^3.

Con las necesidades de agua consideradas de 9.319 m^3/Ha al año, se podrán regar un total de 26.340 ha. en el Bajo Jalón, en los Términos Municipales de Alagón, Alcalá, Alfamén, Almonacid, La Almunia de Dña. Godina, Alpartir, Bárboles, Bardallur, Cabañas

de Ebro, Calatorao, Cariñena, Consuenda, Chodes, Epila, Figueruelas, Grisén, La Joyosa, Lucena, Luceni, Lumpiaque, Pedrola, Pinseque, Plasencia, Pleitas, Ricla, Rueda, Salillas, Sobradiel, Torres de Berrellén, Urrea, Utebo y Zaragoza.

El conjunto de las obras que están actualmente en construcción son las siguientes:

- Azud de derivación.
- Túnel de trasvase.
- Presa de Mularroya.
- Variantes de carretera y reposición de caminos.

Que se describen a continuación:

Azud de derivación

El azud de derivación se localiza en el río Jalón, en la zona de las Hoces del Jalón.

La estructura se sitúa aguas arriba de la pedanía de Embid de la Ribera, a no más de 2 km de distancia de la localidad y unos 700 m aguas abajo de la Central Hidroeléctrica de Embid de la Ribera, propiedad de Eléctricas Reunidas de Zaragoza.

Las obras proyectadas que conforman el conjunto del azud de derivación son:

− Azud vertedero.
− Desvío del río, situado en el estribo izquierdo.
− Tomas y escala para peces, en el estribo derecho.
− Tratamientos del cimiento.
− Casetas de centralización de datos.
− Reposición de carretera inundada y acceso al azud.

El azud proyectado corresponde a la tipología de gravedad, en concreto será de hormigón en masa. El eje de definición del azud es de planta recta, con una longitud de 133,550 m. Los puntos extremos que definen el eje tienen de coordenadas UTM:

A: X = 616.758.
Y = 4.584.978.

B: X = 616.788.
Y = 4.585.108.

Túnel de trasvase

El túnel de trasvase conecta el río Jalón, tomando inmediatamente aguas arriba del azud, y el río Grío, desaguando en la cola del embalse de Mularroya y atraviesa los Términos Municipales de Calatayud, Paracuellos de la Ribera, El Frasno y Morata de Jalón.

Se trata de un túnel hidráulico que va a funcionar en lámina libre para un caudal nominal de 8 m^3/s, con un calado de 1,94 m, un grado de llenado de 66,9% y una velocidad de 1,579 m/s en régimen lento.

El túnel de trasvase tiene una longitud de 12.815,514 m, con dirección predominante Oeste-Este. El origen se encuentra en el punto de coordenadas UTM:

X = 616.898
Y = 4.584.962

Las coordenadas UTM del punto final del trazado son

X = 629.293
Y = 4.586.586

Presa de Mularroya

La Presa de Mularroya se localiza en el río Grío, afluente del río Jalón, que desemboca en la localidad de Ricla. La presa tiene su estribo izquierdo en el Término Municipal de Chodes y el derecho en el Término Municipal de La Almunia de Dña. Godina.

La altura de presa es 83,50 m desde el fondo del cauce y 90,5 m desde los cimientos. Tiene su coronación a la cota 483,50 m. La presa proyectada es de materiales sueltos, del tipo heterogénea. El eje de definición es circular con radio de 663,793 m.

Con el embalse al máximo nivel normal, cota 477,00 m., la superficie inundada es de 463,1 has, con un volumen de agua de 103,3 hm^3.

El vaso inundado afecta a una extensa zona rural de secano, a la carretera N-IIa y la carretera autonómica A-2302. También afecta al oleoducto de CAMPSA, diversas líneas de alta tensión y el complejo hostelero "Parque de Mularroya".

El nivel de la avenida de Proyecto alcanza la cota 478,28 m., con una superficie inundada de 481,5 has y un volumen de embalse de 109,3030 hm3, mientras que el nivel de la avenida extrema se sitúa a la cota 479,3, afectando a 498,38 has, con un volumen de embalse de 114,5229 hm^3. Se espera un volumen de acarreos del embalse a lo largo de 50 años de 13 hm^3, con unas aportaciones sólidas anuales de 260.000 m^3/año.

El cierre de la cerrada consta de la presa y un tapiz de impermeabilización en el estribo derecho.

Como conclusión acerca de la recarga artificial del acuífero de Campo Cariñena, esta obra facilitará la recuperación piezométrica del propio acuífero.

RECARGA ARTIFICIAL EN EL CAMPO CARIÑENA

Los motivos por lo que se ha planteado este proyecto, es que como ya se ha mencionado anteriormente en la descripción de la presa de Mularroya, la Unidad Hidrogeológica de Campo de Cariñena ha sufrido descensos del nivel piezométrico de

casi 60 m en los últimos 20 años debido a la gran sobreexplotación generada por las extracciones para riego de la zona.

Además hay que sumar los problemas generados por las inundaciones que se han dado en La Almunia de Doña Godina.

Por lo tanto, la Confederación Hidrográfica del Ebro ha adjudicado la construcción de una serie de diques a la empresa Hermanos Caudevilla, SL., por un presupuesto de 526.524 €.

Con la realización de este proyecto se espera normalizar el nivel piezométrico del acuífero, obtener un aumento de los recursos hídricos subterráneos, conseguir una mejora de la calidad del agua al aumentar la cantidad de agua que provoca una reducción en las concentraciones de los contaminantes y aliviar los efectos de inundación que últimamente llevan ocurriendo en La Almunia de Doña Godina tras lluvias torrenciales.

Para obtener estos fines, se ha proyectado una limpieza del cauce de 25 cm de profundidad previa a la construcción de 14 diques en los barrancos de Aguarón y Cosuenda, que favorecerán la retención de agua para que se produzca la infiltración y así se recargue el acuífero.

La separación de los diques estará entre 200 a 300 m, tendrán una altura entre 1 a 2 m y los taludes serán 3H/2V.

Los materiales que se utilizarán para la construcción de estas infraestructuras serán materiales procedentes de la excavación del cauce para el núcleo, geotextiles, láminas de PEAD y gaviones rellenos del material excavado aprovechando los cantos de más de 0,10 m.

También se tiene previsto la construcción de 9 motas longitudinales con taludes de 3H/ 2V y una serie de piezómetros para analizar el estado del acuífero durante la fase de construcción del proyecto y su efectividad a largo plazo.

Estas medidas se complementarán con la influencia que tenga la presa de Mularroya.

Cataluña

RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS EN BARCELONA

Los suministros aportados por los ríos Ter y Llobregat son de gran importancia puesto que son el principal abastecimiento de agua de la ciudad de Barcelona.

El nacimiento del río Llobregat está localizado al norte de Barcelona en el municipio de Castellar de n'Hug, a 1.295 m de altitud en la Sierra del Cadí. Hasta su desembocadura en forma de delta en el Mediterráneo, el río Llobregat atraviesa la cordillera Costero Catalana y alcanza una longitud de 156,5 km.

La cuenca formada por el Llobregat, tiene aproximadamente unos 4.948 km^2 y proporciona agua a sectores de la agricultura y de la industria además del propio abastecimiento de los municipios que atraviesa.

Como ya se ha mencionado, la desembocadura forma un delta con una llanura litoral que presenta problemas de colmatación y de inundación durante grandes crecidas del río, como la del 2005 que llegó a afectar al aeropuerto del Prat.

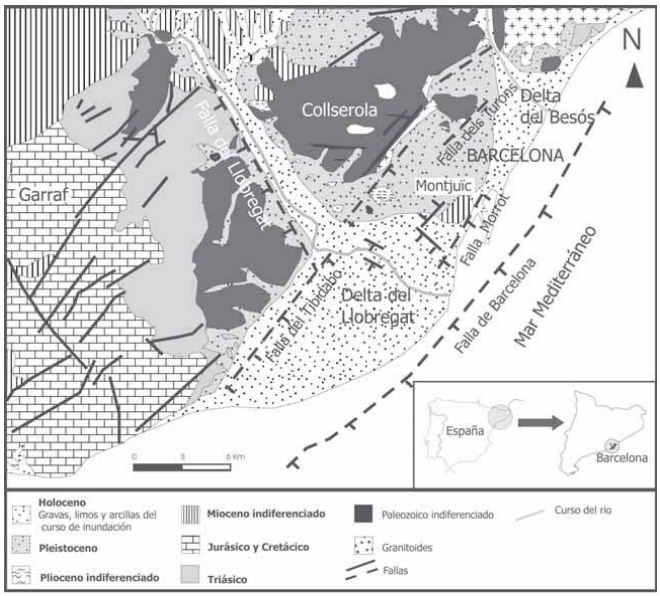


Figura 1-17. Mapa geológico del delta del río Llobregat y sus alrededores. Tomado de Almera, 1991.

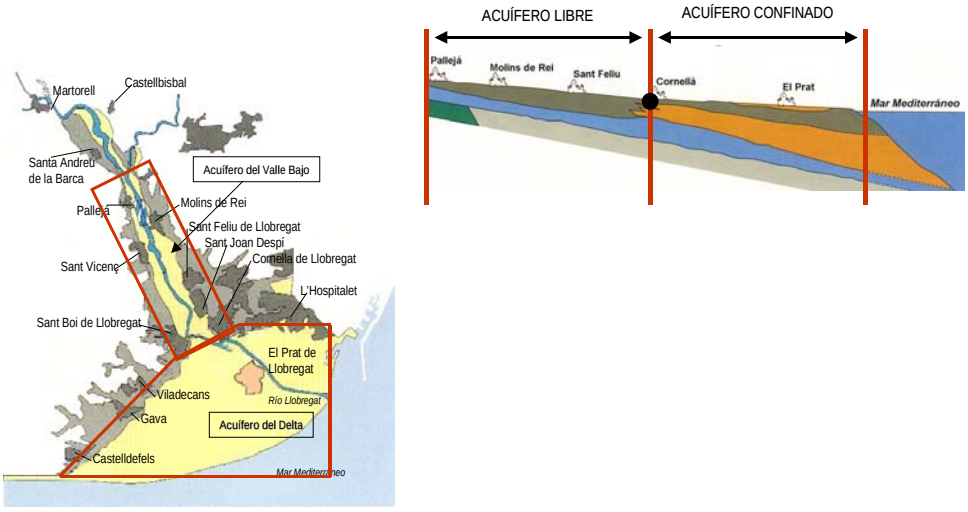
En esta zona se han instalado varios dispositivos de recarga artificial con bastantes buenos resultados y que se van analizar a continuación:

RECARGA ARTIFICIAL REALIZADA EN EL VALLE BAJO Y DELTA DEL LLOBREGAT

Tanto en el Valle Bajo como en el delta del Llobregat, los acuíferos están compuestos de arenas y gravas. En concreto, el acuífero situado en el Valle Bajo del Llobregat es un acuífero aluvial libre formado por 5 terrazas aluviales cuaternarias cuya longitud es de unos 10 km y su anchura varía entre 250 y 2.100 m.

En esta zona la recarga por infiltración es muy importante por que el acuífero está muy conectado al comportamiento del río Llobregat.

Sin embargo, en la zona del delta, el acuífero se divide en dos por medio de una cuña de limos cuyo espesor aumenta al llegar a la desembocadura hasta unos 40 m. Por lo tanto, en la zona del delta hay un acuífero superior con un espesor que varía entre 6 a 20 m y otro profundo confinado con una potencia de 1.025m.



Figuras 1-18 a) y b). Situación y sección del acuífero del Valle Bajo y del Delta del Río Llobregat. Tomado de Armenter, 2006.

Las extracciones de agua realizadas durante gran parte del siglo XX provocaron grandes depresiones en los niveles piezométricos del acuífero y por consiguiente su contaminación por intrusión marina.

Debido a esta gran problemática, en 1985 queda configurada la Comunidad de Usuarios del delta del Llobregat (CUADLL) y que junto a otros organismos como la Agencia Catalana del Agua (ACA), Agbar S.A. etc. han llevado a cabo varias medidas de recuperación de los acuíferos y que a continuación se exponen:

Escarificado:
Como ya se ha mencionado anteriormente, el acuífero del Valle Bajo depende mucho del comportamiento del río para que se produzca la infiltración de agua en él. Para conseguir este objetivo, se lleva aplicando desde 1950 un sistema de recarga artificial en superficie por medio de un tractor, que escarifica el lecho del río y lo limpia de sedimentos que pueden generar procesos de colmatación. Se realiza cerca del municipio de Pallejà, situado en el Valle Bajo del Llobregat. Coordenadas de la zona del escarificado:

X: 417.165
Y: 4.585.592

Inyección profunda (ASR):
Consisten en 12 pozos situados en Cornellá, que desde 1969 recargan artificialmente el acuífero con aguas provenientes de la planta de tratamiento de San Joan dÉspi.

Durante su instalación se aprovecharon siete pozos ya existentes y se construyeron otros cinco más, pero con mayor zona ranurada para poder incrementar el caudal de recarga artificial en ellos.

Los siete pozos ya construidos son sondeos entubados de 950 mm de diámetro que alcanzan profundidades de 40 a 60 m. Diez metros de estos sondeos están ranurados, coincidiendo con los espesores del acuífero profundo del Delta del río Llobregat.

Estos pozos ya disponían de equipos de bombeo, y por tanto, solo fue necesario instalar la tubería que conduce el agua de recarga hasta un punto del pozo por debajo del nivel del agua y así minimizar la entrada de oxígeno en el acuífero.
El caudal de recarga instantáneo total de esta batería de pozos ronda los 50 l/s.

Los cinco pozos posteriores que se construyeron para la recarga artificial en la segunda etapa, son del mismo diámetro y profundidad que los anteriores, pero su zona de rejilla es de unos 15 a 20 m., con lo que se consigue una mayor zona de conexión con el acuífero, y por tanto, se incrementa el caudal de recarga a unos 100 l/s.

La capacidad total de recarga artificial del sistema es de unos 75.000 m^3 al día.

Esta medida se realiza cuando el acuífero es poco transmisivo o cuando hay intercalaciones de capas permeables e impermeables.

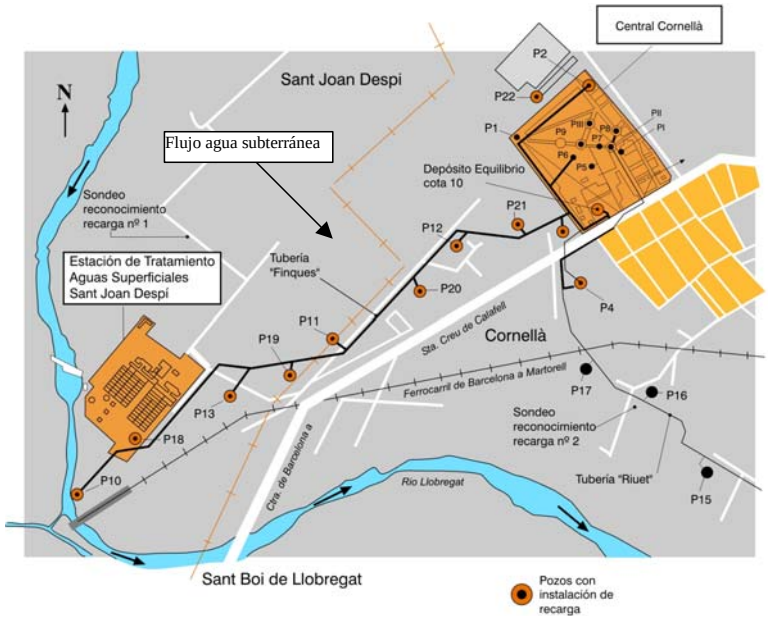


Figura 1-19. Situación pozos de recarga en profundidad del acuífero del Delta del río Llobregat. Tomado de Armenter, 2006.

Para los siete primeros pozos, se debe realizar la limpieza tras infiltrar unos 60.000 m^3, o lo que es lo mismo, después de 15 días de recarga continuada.

Para el resto de los pozos, la limpieza se debe realizar tras haberse infiltrado 120.000 m^3 por cada pozo, o lo que es lo mismo, cada 15 días de recarga en continuo.

Se ha solicitado la posición geográfica exacta de los pozos de AR a AGBAR. Sus coordenadas UTM son:

Pozo	X	Y
2	42174478	57920535
3	42167452	57881705
4	42170094	57864018
10	42036457	57820974
11	42104176	57852352
12	42139909	57879306
13	42075131	57841512
18	42049798	57827054
19	42092343	57847733
20	42118515	57861415
21	42156504	57879354
22	42165157	57918466

Tabla 1-04. Coordenadas de los pozos que constituyen la batería de AR de AGBAR.

Balsas de recarga artificial:
Consisten en un sistema de balsas de decantación y de infiltración cuyo objetivo es la recarga artificial anual de 10 hm^3 de agua. Estas balsas están situadas en el Municipio Sant Vicenç dels Horts.

Balsas en Santa Coloma de Cervelló:
Están proyectadas también una serie de balsas cuya construcción se procederá en 2011.

Figura 1-20. Balsa de Sant Vicenç dels Horts. Foto cortesía de E.Queralt.

BALSA DE SANT VICENÇ DELS HORTS

Las Coordenadas de la balsa de Vicenç dels Horts son:

X: 4.186.22
Y: 4.581.988

Las coordenadas de las nuevas balsas de Sta. Coloma de Cervelló son:

X_1: 4.183.92
Y_1: 4.582.351
X_2: 4.185.79
Y_2: 4.582.025

BARRERA HIDRÁULICA ANTE LA INTRUSIÓN MARINA

Debido a la sobreexplotación del acuífero del delta del Llobregat, la Agencia Catalana del agua ha realizado una barrera constituida por una serie de pozos (actualmente hay 15 pozos en funcionamiento) en los que se recarga artificialmente agua procedente de la ETAP del Prat para elevar el nivel de agua del acuífero e impedir el avance de la intrusión marina.

Figura 1-21. Situación de la barrera hidráulica. Tomado de Ortuño, en IGME, BGM 2009.

La ubicación exacta de los primeros pozos es:

Nº de pozos	X	Y	Z (GPS)
Pozo 1	426574	4574120	2 m.
Pozo 2	426877	4574337	2 m.
Pozo 3	427103	4574553	2 m.
Pozo 4	427351	4574797	2 m.

Tabla 1-05.Coordenadas con la ubicación exacta de los distintos pozos.

RECARGA ARTIFICIAL EN LA CUBETA DE SANT ANDREU

La Cubeta de Sant Andreu abarca una extensión aproximada de unos 12 km^2 y se encuentra en la Depresión del Vallés, que está situada entre la Cordillera Prelitoral y la Litoral. Esta zona está marcada por fracturas con dirección N-SW y otras con dirección NW-SE. Son estas últimas las que rigen la circulación del río Llobregat puesto que su cauce circula por una de estas fallas.

El origen de esta cubeta es Neógeno pero después sufrió una sedimentación discordante de materiales aluviales cuaternarios transportados y depositados por el propio río Llobregat en forma de terrazas.

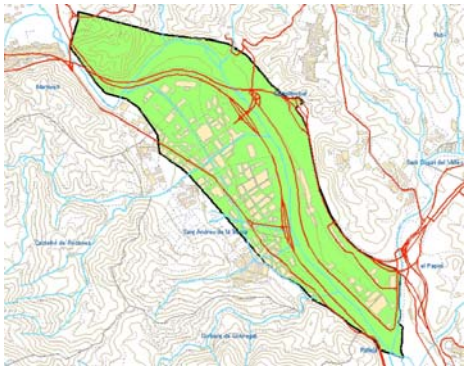


Figura 1-22. Cubeta de Sant Andreu. Foto: CUACSA.

El hecho del auge de la industria en los años 60-70, el aumento de la demanda para regadío de la agricultura en los municipios de Sant Andreu de la Barca, Castellbisbal y Corbera, junto a la construcción de la presa de Baells en el año 1976 han producido que la recarga natural de la cubeta disminuyera.

El momento de alarma fue en 1985 a causa de una sequía que generó un gran descenso en los niveles piezométricos en el acuífero. A raíz de este problema se constituyó la Comunidad de Usuarios de aguas de la Cubeta de Sant Andreu de la Barca, que es una institución que se encarga de la gestión de las aguas subterráneas.

Por ello, se comenzó la recarga artificial de la Cubeta como una medida de gestión y mejora de la calidad de las aguas del acuífero. Esta recarga artificial comenzó con la construcción de un conjunto de balsas de infiltración (con una separación de 2 m entre ellas) en el meandro de Can Albareda, Castellbisbal.

Sin embargo, en estas balsas se daban procesos de colmatación por acumulación de finos en el fondo, y por ello se requería que se secaran para posteriormente limpiarlas mediante una retroexcavadora. Todo este proceso había que llevarlo a cabo cada 30 días.

En 1997, debido a la construcción de la autovía del Baix Llobregat, hubo que modificar dichas balsas. Una vez modificadas las balsas, la avenida del año 2000 las destrozó y tuvieron que volver a ser reconstruidas.

En el año 2007 se iniciaron los trabajos de recuperación de las balsas de Castellbisbal para la recarga artificial de acuíferos y la creación de una serie de humedales. Con la construcción de dichas balsas se ha obtenido una superficie de humedales de 14.000 m^2 y una superficie de infiltración de 6.000 m^2, con una tasa de infiltración de 1-2 m^3/m^2/día.

Al final, el objetivo de estos dispositivos es el de conseguir una recarga artificial de 1,6 hm^3/año.

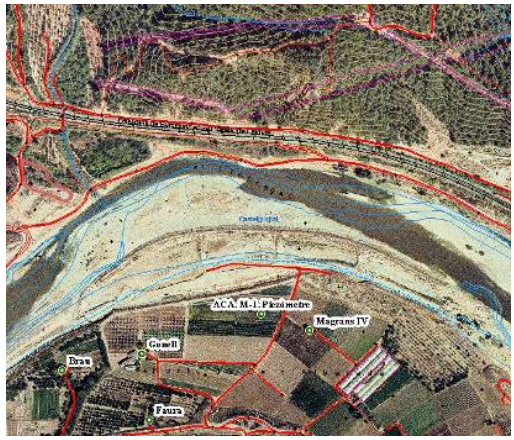


Figura.1-23. Balsas de Castellbisbal tras la construcción de la autovía del Baix Llobregat Foto: Comunidad de Usuarios de la Cubeta de Sant Andreu.

Coordenadas de la balsa de Castellbisbal:

X: 413.050
Y: 4.592.040

A parte de las balsas de infiltración, hay que mencionar un sistema de pozos de drenes radiales en Martorell, cuyo objetivo era suministrar agua al río en épocas de sequía, pero que desde los dos últimos años, el agua obtenida de estos pozos es potabilizada en la Planta de Tratamiento de Abrera.

Datos de los pozos radiales de Martorell

Martorell-1:

X = 411.124
Y = 4.592.861

Martorell-2:

X = 410.567
Y = 4.593.645

Martorell-3:

X = 410.257
Y = 4.594.497

RECARGA ARTIFICIAL EN EL ALUVIAL DEL BESÓS

El río Besós está situado al norte de la ciudad de Barcelona. Su cauce tiene una longitud de 17,7 km de recorrido y nace de la unión de los ríos Mongent y Congost en la comarca del Vallés Oriental y desemboca formando un delta en el municipio de San Adrián de Besós.

Este río consta de un acuífero aluvial libre formado por arenas y gravas mientras que en el delta, análogamente al Llobregat, hay dos acuíferos separados por un nivel de limos.

El río Besós ha tenido (y tiene) una importante contaminación debido al crecimiento de la industria y de la propia población que ha afectado a los acuíferos asociados al río. Esto conllevó al abandono de las captaciones, lo cuál ha producido que los niveles de los acuíferos se incrementasen y generasen inundaciones en edificios y estructuras adyacentes.

Sin embargo, el 10% del abastecimiento de agua para la ciudad de Barcelona es proporcionado por el río Besós mediante una ETAP inaugurada en 2002.

Actualmente, hay una recarga artificial inducida en el río mediante pozos que deprimen el nivel freático y hacen que parte del agua abastecida por el propio río se infiltre.

GESTIÓN DEL AGUA REGENERADA EN LA COSTA BRAVA Y RECARGA ARTIFICIAL EN BLANES.

Actualmente, en el Consorcio de la Costa Brava se está realizando una gestión del agua regenerara.
Hay un gran número de motivos por los que se ha llegado ha aplicar este tipo de gestión del agua y no sólo con fines de potabilidad, como solemos pensar normalmente, sino también para usos en los que no se requiere agua potable.

Por un lado, el agua está considerada como un recurso local y auxiliar que permite el ahorro de agua y energía y por el otro, supone un alivio de la presión generada en el ecosistema de la zona.

Además, como proyecto, no requiere de una gran inversión y no le afecta los cambios de estaciones, ya que puede realizar una operación continua durante todo el año. La influencia social es positiva puesto que la población suele aceptar este tipo de propuestas.

Siendo más concretos, las razones por las que se está llevando a cabo la reutilización del agua en la Costa Brava son varios.

Esta zona se caracteriza por sufrir sobreexplotación y contaminación en los acuíferos debidos al aumento de población y a la demanda de agua no potable para diferentes usos, como zonas ajardinadas o campos de golf. Todo ello ha provocado la búsqueda de diferentes soluciones, como pueden ser la desalación, depuración etc. Al final, la elección de la reutilización del agua se considera una medida de gestión más eficiente de los recursos hídricos de los que se dispone.

Desde el punto de vista de la asignación de precios al agua regenerada, el Consorcio de la Costa Brava distingue dos tipos de reutilización:

- No facturable: Este tipo de reutilización no depende de la demanda y su producción está financiada por la Agencia Catalana del Agua. En esta división se puede encontrar actualmente varias medidas que se están llevando a cabo como la recarga artificial de acuíferos en Blanes, el control de la intrusión marina en Llançà y Port de la Selva, la reutilización ambiental en el Parc Natural dels Aiguamolls de l'Empordà y la mejora del riego agrícola para los usuarios que han visto reducidas sus dotaciones para la producción de agua potable en Torroella de Montgrí.

- Facturable: Al contrario que en el caso anterior, esta reutilización depende completamente de la demanda ya que su suministro es para el usuario privado. Los ejemplos que podemos encontrar son campos de golf, plantaciones de maíz y de vid y zonas de huertas

A continuación se va analizar el tema que más nos interesa para el inventario de la recarga artificial, el caso de Blanes.

Los acuíferos superficial y semiconfinado que se encuentran en Blanes presentan una buena transmisividad, que alcanza los 9.000 m^2/día en el primer caso y 4.300 m^2/día en el segundo (ITGE, 1994). La gran sobreexplotación llevada a cabo durante los últimos 40 años ha provocado el avance de la intrusión marina hasta 2 km tierra adentro.

Concretamente, la Unidad Hidrogeológica del Baix Tordera (U.H.10.12) es un acuífero aluvial de extensión 30 km^2. El acuífero libre está formado por gravas, arenas, lutitas y limos y su espesor varía entre 4 a 30 m mientras que el acuífero semiconfinado está constituido por arenas, gravas, alternancias de lutitas y limos grises y negros con alta cantidad en materia orgánica.

Por lo tanto, la recarga artificial de Blanes consiste en una contribución al plan de recuperación del acuífero del tramo bajo el río Tordera que está sobreexplotado.

Esta medida consiste en el retorno de 3 hm^3/año de agua regenerada que antes era vertida al mar y que ahora sirve para la recarga artificial del acuífero y para una mejora de la calidad del agua regenerada, debido al tiempo de residencia en el acuífero y a la dilución con el agua del mismo.

Los dispositivos de recarga artificial consisten en una depuradora y en la canalización del agua depurada por esta planta río arriba, a través de tuberías enterradas durante 3 Km. (mediante 3 bombas alimentadas por energía solar) hasta que llegan a un humedal que permite la recarga artificial del acuífero. Además se ha construido una desaladora que minimiza, en cierta medida, las extracciones del acuífero.

Islas Baleares

RECARGA ARTIFICIAL EN S´ESTREMERA, MALLORCA

La unidad de Estremera se caracteriza por ser de naturaleza caliza con una importante karstificación. Tiene un espesor de 300 m y presenta transmisividades de entre 1500 y 50000 m^2/día. Está conectado hidráulicamente a la unidad hidrogeológica de los Llanos de Palma, por lo que sus recursos se utilizan para el abastecimiento de Palma de Mallorca y para el regadío. Este acuífero sufre también de sobreexplotación.

Para poder aumentar los recursos del acuífero, se comenzó a recargar artificialmente el acuífero mediante los excedentes de los embalses de Gorg Blau y Cúber. Sin embargo, como caracteriza el clima mediterráneo de la zona, estos excedentes sólo se producían en momento de grandes lluvias y no eran suficientes para la recuperación del acuífero.
Por ello, en el año 2000, se planteó un nuevo proyecto de recarga artificial en el que se procedió a aprovechar las aguas provenientes del manantial de Sa Costera, además de suministrar el abastecimiento de las poblaciones de Sóller, Bunyola, Palmanyola y Palma de Mallorca.

El dispositivo que comenzó a funcionar en enero del 2009, consiste en la captación del agua del manantial para su distribución hasta el Puerto de Sóller a través de una tubería submarina de 9.060 m de longitud, 1.000 mm de diámetro y 1,4 m^3 de capacidad máxima. Posteriormente se procede a su almacenamiento en un depósito, para luego ser conducida a los núcleos urbanos anteriormente mencionados y a 8 pozos de 550 mm de diámetro y 200 m de profundidad (ASR) que inyectan el agua en el acuífero de Extremera.

Actualmente, La Conselleria de Medio Ambiente tiene un presupuesto de 1,3 millones de euros para un proyecto que consiste en construir un depósito de 6000 m^3 para que el agua que sobre de Sa Costera sea almacenada y luego inyectada en el acuífero de Estremera para combatir la intrusión marina.

RECARGA ARTIFICIAL EN ARTÁ, MALLORCA

A partir del proyecto de ordenación agrohidrológica de Artá en el que se pretendía combatir la erosión y disminuir los efectos perjudiciales de fuertes avenidas, se procedió a construir a principios de 1996 seis presas en diferentes puntos estratégicos de los torrentes des Parral, des Revoles, des Cocons, des Coloms, sa Palmera y Can Puceta.

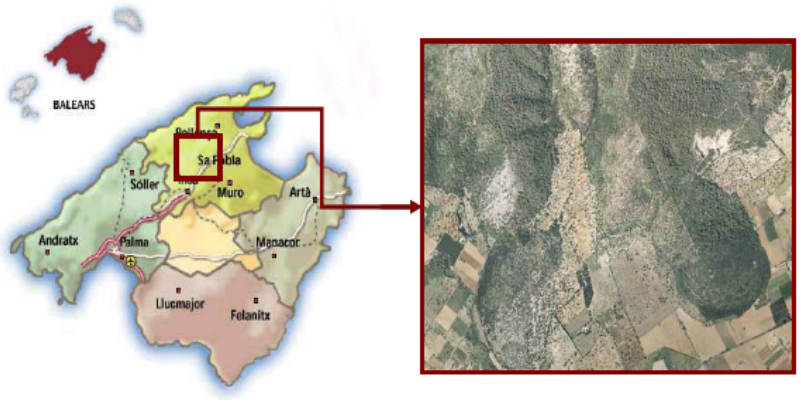
El resultado fue favorable y eso llevó a que el Ayuntamiento de Artá solicitase la construcción de otras dos presas en los torrentes de Betlem y de sa Devessa.

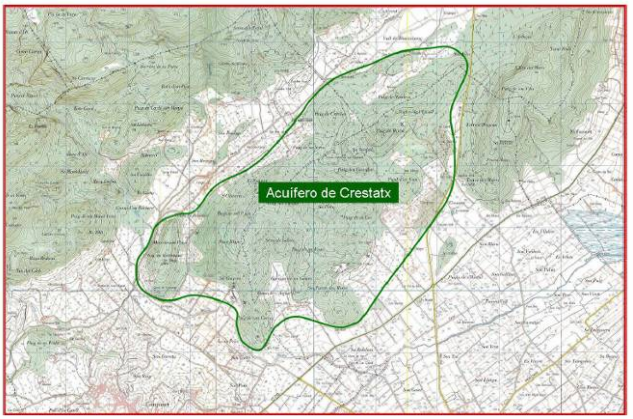
El beneficio añadido a la construcción de estas obras es la recarga artificial inducida por infiltración del acuífero. De todas formas, no se ha realizado ningún estudio de la influencia de estas presas en los niveles piezométricos del acuífero.

PROYECTO DE RECARGA ARTIFICIAL EN CRESTATX, MALLORCA

Actualmente el presente proyecto de recarga artificial está todavía en fase de estudio.

Este acuífero se localiza en la zona nororiental de la isla de Mallorca y su extensión pertenece a los municipios de Campanet, Sa Pobla y Pollensa.





Figuras 1-24 a) y b). Localización del acuífero de Crestatx. Tomado de IGME, 2007.

Tectónicamente, la zona pertenece a la unidad de Albafia-Es Barraca, caracterizada por presentar varios cabalgamientos que son importantes, puesto que generan desconexión hidráulica dentro del propio acuífero.
En cuanto a las litologías se reconocen varias unidades (de más antiguo a más moderno):

- Triásico (Retiense): Constituido por dolomías con intercalaciones de arcillas y margas con un espesor de 120 m.
- Lías: Formado por calizas y dolomías con una potencia de 160 m y de carácter muy permeable.
- Dogger-Malm-Cretácico: Compuesto por margas y margocalizas de baja

permeabilidad y con un espesor de 210 m.

- Paleógeno: Consiste en una alternancia de margas y calizas también de baja permeabilidad.
- Cuaternario: Esta unidad está compuesta por conglomerados, arenas y arcillas con un espesor de 0,5 a 20 m.

Todos estos materiales buzan hacia el SO, por lo que en la zona NE afloran la unidad del Triásico Retitiense y en el SO las unidades de Dogger-Malm-Cretácico.

Por lo tanto, se puede distinguir dentro de este acuífero dos subunidades de acuíferos libres, una superior con una extensión de 3,5 km^2 y otra inferior con una extensión de 8 km^2.

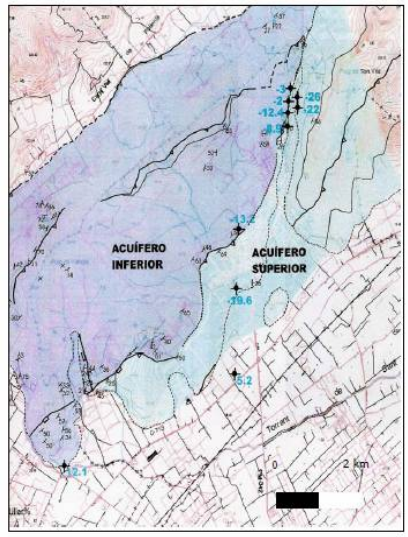


Figura 1-25. Acuíferos superior e inferior. Tomado de De la Orden y Murillo, Boletín Geológico y Minero, 120, IGME, 2009.

Debido a su situación, este acuífero no presenta problemas por contaminación salina, pero como en el sur está conectado hidráulicamente con el Llano de Inca-Sa Pobla, se está produciendo contaminación de nitratos procedentes de la agricultura de esa zona.

Para remediar este problemática se plantea el cierre de algunos de los pozos de abastecimiento del Llano de Inca-Sa Pobla, suministrar a la región con agua del acuífero de Crestatx y proceder a la recarga artificial como medida para evitar una posible sobreexplotación de dicho acuífero.

El dispositivo que actualmente se está planteando es la instalación de las infraestructuras hidráulicas superficiales necesarias para la captación y distribución del agua desde el manantial de las Ufanes de Gabellí, junto a una balsa de decantación y una serie de sondeos de reinyección que sirvan para recargar artificialmente el acuífero.

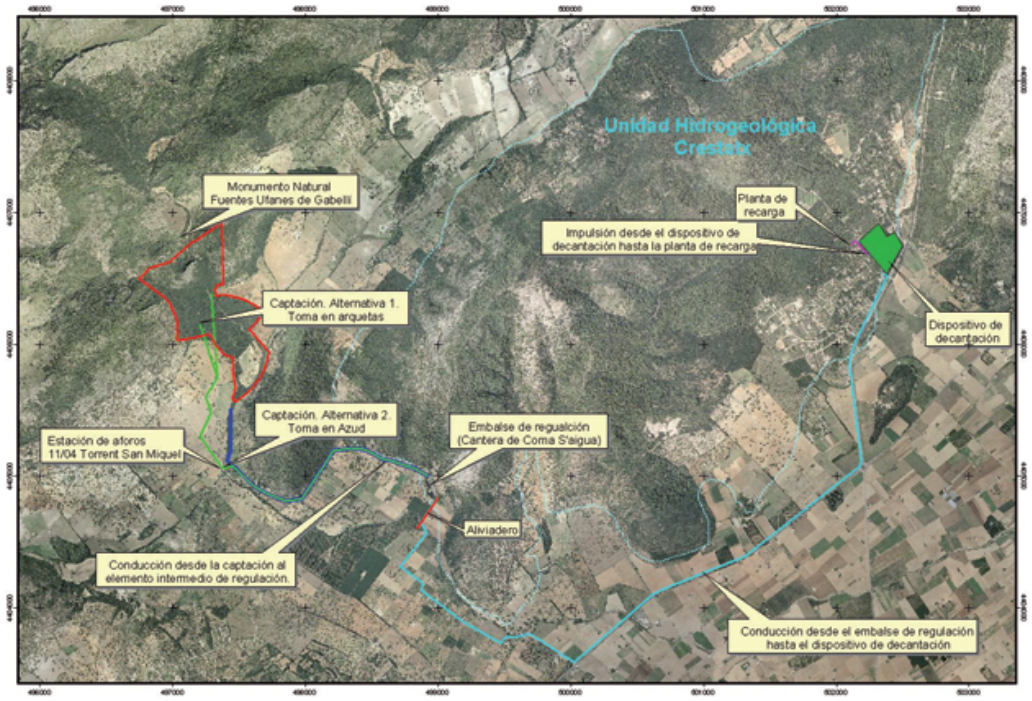


Figura 1-26. Dispositivo de recarga artificial propuesto. Tomado de De la Orden y Murillo, Boletín Geológico y Minero, 120, IGME, 2009.

Como ya se ha mencionado, este estudio todavía no ha sido finalizado y por lo tanto este dispositivo propuesto todavía no es definitivo.

Castilla y León

El acuífero donde están situados los siguientes dispositivos de recarga artificial que se van a analizar se conoce como acuífero de los Arenales o Unidad Hidrogeológica 02-17. Se trata de una área de aproximadamente 1.500 km^2 cuyo origen es poligénico.

En este acuífero se han llevado a cabo las siguientes experiencias de recarga artificial promovidas por el Ministerio de Agricultura (actual Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino) y la Junta de Castilla y León en la Comarca de Carracillo y en la Cubeta de Santiuste.

RECARGA ARTIFICIAL EN LA CUBETA DE SANTIUSTE

La Cubeta de Santiuste se encuentra en el sector oeste de la provincia de Segovia y al sureste de la provincia de Valladolid, y está comprendida entre los municipios de Llano de Olmedo, Villeguillo, Coca y Santiuste de San Juan Bautista.

Ubicada en la margen izquierda de los ríos Voltoya y Eresma, cuenta con una superficie aproximada de 45 km^2

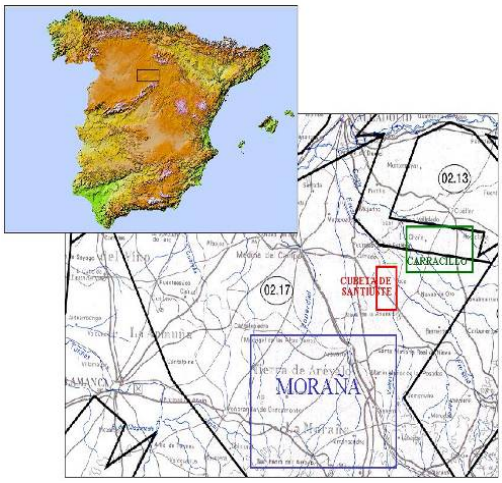


Figura 1-27. Situación geográfica del acuífero de los Arenales o UHG 02-17 y su posición dentro de España (Escala del mapa 1:200.000).
Figura 1-28. Entorno de la zona de estudio sobre la cartografía 5L del SGE.

Como ya se ha mencionado, se trata de una superficie poligénica, caracterizada por formaciones cuaternarias como la Unidad Arévalo, que alcanza potencias de hasta 55 m y rellena una cavidad compleja de un sustrato de edad miocena bien arcilloso (Facies Cuestas) o areno-arcilloso subyacente (Facies Puente Runel). Estas últimas facies afloran en los bordes de la superficie del páramo y en los escarpes de los ríos Eresma y Voltoya.

La unidad Arévalo da origen a la superficie morfológica de Coca-Arévalo, constituida por depósitos arenosos de origen fluvial, parcialmente recubierta por depósitos eólicos y áreas endorreicas con varios sistemas lagunares ya fosilizados.

A continuación se presenta la cartografía geológica de la Cubeta mediante un bloque diagrama con el Modelo Digital del Terreno (MDT) de la zona de estudio. Los principales relieves coinciden en gran medida con los afloramientos de facies terciarias, así como la presencia de depósitos de piedemonte en la margen oeste del arroyo de la Ermita. Además hay varios sistemas de terrazas fluviales sobrepuestos en las márgenes de los ríos Voltoya y Eresma, con distribución asimétrica y mayor desarrollo en la margen izquierda de los cauces.

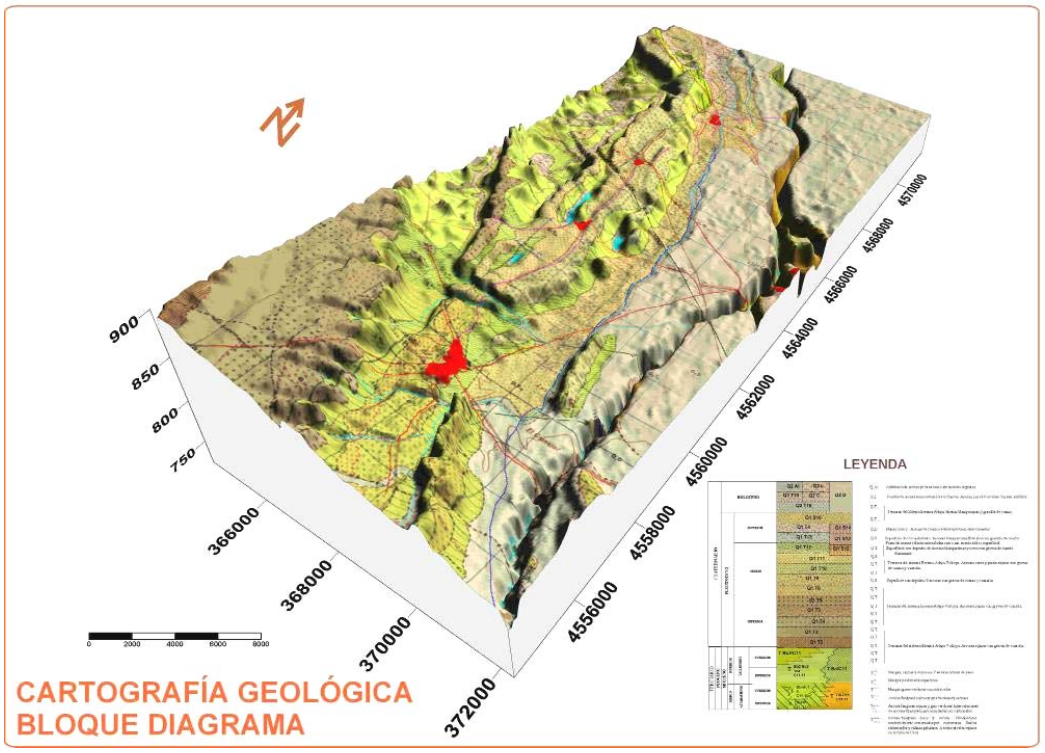


Figura 1-29. Bloque diagrama del MDT de la zona de estudio con una capa ráster sobrepuesta correspondiente al mapa geológico revisado.

El dispositivo de recarga artificial está compuesto por canales, balsas y pozos, que se encargan de infiltrar los excedentes invernales derivados del río Voltoya, para luego usarse en el periodo estival.

Comienza a partir de un pequeño embalse en el río Voltoya, desde donde parte una tubería enterrada de 10 km de longitud pendiente abajo, que termina en un depósito (cabecera del dispositivo) de 36 m^3 en cuya entrada hay instalado un caudalímetro.

El depósito vierte en una balsa de decantación de 14.322 m^2 de superficie, de la que parten los dos canales principales. El originario o “Caz Viejo”, comenzó a funcionar en 2002 por el este de la Cubeta; y el “Caz Nuevo”, operativo desde 2005, discurre semiparalelo al anterior y a su izquierda.

El “Caz Viejo” o Canal Este tiene un trazado que coincide en un 20 % con el cauce del antiguo arroyo de la Ermita. El canal tiene 54 dispositivos de parada para incrementar la infiltración a través de una superficie que ronda los 33.300 m^2, considerando la infiltración por el fondo y por las paredes.

El “Caz Nuevo” o Canal Oeste tiene una longitud total de 17.293 m. Está ubicado en el sector de máximos espesores del acuífero, por lo que su superficie de infiltración efectiva es prácticamente total. La superficie de infiltración es de 27.960 m^2.

El caudal procedente del río Voltoya está alrededor de unos 0,5 m^3/s, con un periodo de concesión que se extiende desde el primero de noviembre al último día de abril, si bien esta concesión depende del carácter de cada año hidrológico.

Figuras 1-30 a) y b). Cabecera del dispositivo de AR y balsa de decantación de la que parten ambos canales.

En la siguiente figura (1-31) se muestra el dispositivo sobre la cartografía de isopacas del acuífero arenoso cuaternario. En él se pueden diferenciar los canales, balsas, etc., así como la ubicación de los puntos de la red de control de la piezometría (RCP), la ubicación de las estaciones de aforo secuenciales y de estudio de evolución de la tasa de infiltración.

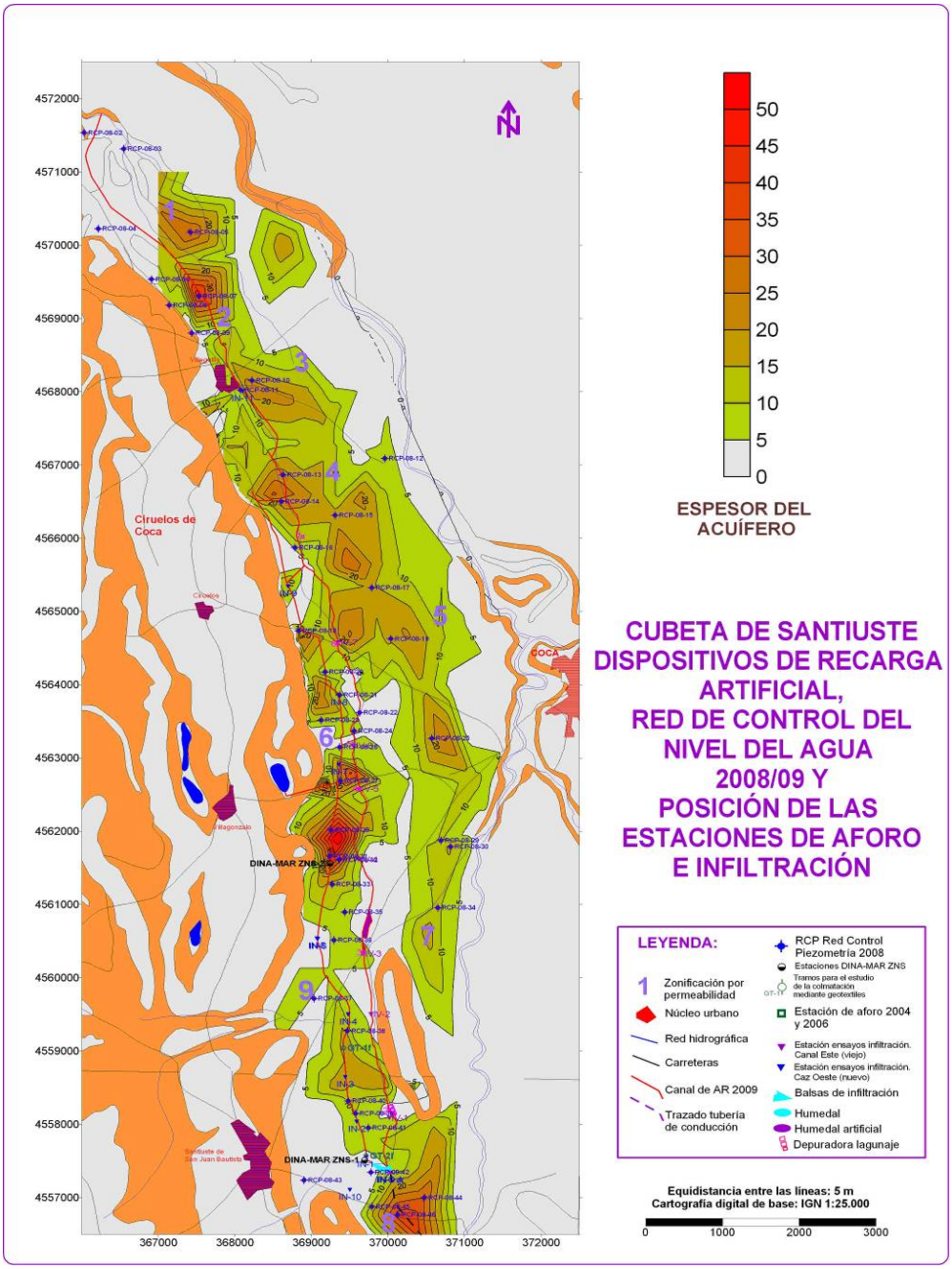


Figura 1-31. Cartografía con el trazado del canal de recarga artificial y la ubicación de las estaciones de aforo. El mapa presenta además la posición de los ensayos de infiltración realizados a lo largo de los años 2004-2008, de los puntos de la red de control de la piezometría, de las estaciones DINA-MAR ZNS y otros elementos singulares. Escala gráfica.

RECARGA ARTIFICIAL EN LA COMARCA DE CARRACILLO

La comarca del Carracillo está localizada a aproximadamente 40 Km hacia el este desde la zona precedente. Ocupa una extensión cercana a 150 km^2 y se ubica en el interfluvio de los ríos Cega y Pirón. Cuenta con una extensa cultura de regadío, con al menos 2.700 hectáreas regadas con aguas subterráneas.

La explotación del acuífero Cuaternario superficial ha sido creciente en las últimas décadas, motivando el descenso del nivel freático a una media de 10 m, con procesos de salinización y contaminación aparejados.

El Carracillo cuenta con cierta tradición en recarga artificial mediante acequias sin revestir, si bien los primeros dispositivos de cierta envergadura no comenzaron a funcionar hasta el invierno de 2006/07, año en el que se terminaron las obras llevadas a cabo por Tragsa y se introdujeron cerca de 8 hm^3 al acuífero mediante canales y balsas de infiltración.

En la comarca del Carracillo las obras se han llevado a cabo bajo criterios similares a los de la Cubeta de Santiuste.

El agua procede del río Cega desde una presa construida en Narros de Cuellar, discurre casi 18 km enterrada para emerger en un dispositivo en las inmediaciones de Gomezserracín.

Figura 1-32. Balsa de decantación y represa en Gomezserracín.
Figura 1-33. Canal de recarga artificial.

Desde ahí parte un intrincado sistema de canales con escasas balsas y pozos de gran diámetro.

La longitud total, contabilizando los canales modernos y las acequias preexistentes, alcanza, según cálculos del Grupo Tragsa, la longitud de 40.744 m lineales que sirven para la recarga artificial del acuífero en la zona.

RECARGA ARTIFICIAL EN ALCAZARÉN, VALLADOLID

La Directiva 86/466 CEE declaró "zona desfavorecida" a los municipios de Remondo (Segovia) y Olmedo, Íscar, Pedrajas de San Esteban y Alcazarén (Valladolid).

Esta declaración significa que la Junta de Castilla y León debe acometer medidas encaminadas a favorecer la economía, aumentar la renta de la población de estos municipios y evitar el abandono de estos pueblos.

Para ello se van a realizar una serie de obras en Remondo (Segovia) y Pedrajas de San Esteban, Íscar y Alcazarén para recargar artificialmente el acuífero cuaternario de Alcazarén. Su coste es de 2.200.000 € y permitirá el riego de 520 ha.

Para favorecer esta obra, se formado una comunidad de regantes que agrupa a 190 propietarios.

El municipio de Alcazarén se sitúa en el Valle del Eresma, encontrándose su núcleo urbano a 739 metros sobre el nivel del mar y a 35 km de la capital provincial. El término es atravesado por la carretera nacional N-601, caracterizándose su territorio por la intensificación de los usos agrícolas (en secano y regadío) junto con extensas áreas de pinar.

El dispositivo de recarga artificial consiste en la captación de agua del río Pirón en el término municipal de Remondo y de la EDAR de Pedrajas de San Esteban y su conducción mediante tubería y canales superficiales para generar la infiltración del agua en el acuífero y así aliviar y si es posible solucionar la sobreexplotación del acuífero y obtener la recuperación de 3 bodones antiguos (humedales) de Alcazarén.

A la salida de la EDAR de Pedrajas, se vigilará la salinidad del agua para evitar la contaminación del acuífero. Si los valores estuvieran por encima de lo admitido, esa agua se desviaría directamente al río.

Comunidad de Madrid

RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO DETRÍTICO TERCIARIO DE MADRID

El acuífero terciario detrítico de Madrid ocupa unos 6.000 km^2 y su espesor varía pero en algunos puntos alcanza los 3.000 m.

Este acuífero se compone por limos y arcillas con lentejones de arenas que son las capas de interés para la extracción del agua.

Debido a que la Comunidad de Madrid tiene un clima Mediterráneo con una gran irregularidad en la distribución de las lluvias, y por tanto, también en los aportes de los ríos, el abastecimiento de la ciudad de Madrid más los municipios que componen la Comunidad de Madrid es un tema de gran relevancia. Por esto, el Canal de Isabel II ha considerado la técnica de recarga artificial de acuíferos como una medida de sostenibilidad para el acuífero.

En el momento de establecer que dispositivos son los más adecuados para la zona, se descartaron los superficiales (balsas de infiltración) ya que la red de pozos del Canal de Isabel II se encuentra a 150-200 m de profundidad y es a esa cota donde interesa realizar la recarga artificial.

Otro aspecto que se tuvo que tener en cuenta para la construcción de estos dispositivos es la compatibilidad química entre las aguas con las que se pretende recargar y las del propio acuífero.

En el estudio realizado por el Canal de Isabel II, el agua de la recarga artificial tiene una mineralización baja, del orden de 50-120 µS/cm, con temperaturas entre 8-10º C muy escasos sólidos en suspensión. Mientras tanto el agua procedente del acuífero está más mineralizada, con conductividades entre 250-350 µS/cm y con temperaturas entre 18-25ºC.

COMPOSICION QUIMICA DE LAS AGUAS

PARAMETRO	VALOR	
	AGUA RECARGA	AGUA ACUIFERO
pH	7,74	7,82
T	9 ºC	20 ºC
Ca	12,1 mg/l	10,7 mg/l
Mg	2,16 mg/l	2,40 mg/l
Na	5,94 mg/l	28,0 mg/l
K	0,73 mg/l	5,30 mg/l
HCO^-_3	21,20 mg/l	143,60 mg/l
Cl	9,20 mg/l	9,02 mg/l
SO^{2-}_4	8,14 mg/l	1,74 mg/l
Fe	0,008 mg/l	0,027 mg/l
O_2	13,5 mg/l	7,38,5 mg/l

Tabla 1-06.Composición química de las aguas del acuífero y de la recarga artificial. Tomado de López-Camacho e Iglesias, Canal de Isabel II, 2007.

El agua procedente de la mezcla de estos dos tipos de aguas y la resultante de su reacción con la matriz sólida del acuífero sigue estando subsaturada en casi todos los minerales, salvo en oxi-hidróxidos de hierro y manganeso, que pueden precipitar. Sin embargo, sus volúmenes de precipitación son muy pequeños en comparación con toda la cantidad de agua que se pretende recargar, y por lo tanto, es un efecto despreciable.

Los dispositivos que se han instalado han sido tres:

Casilla de Valverde (Colmenar Viejo, al norte de la ciudad de Madrid).
X: 441.154
Y: 4.487.401

FE-1R (al norte de la ciudad de Madrid).
X: 438.579
Y: 4.486.665

La Cabaña (al oeste, en Pozuelo de Alarcón).
X: 429.635
Y: 4.474.610.

Con anterioridad al 2001, que es cuando se efectúo la construcción de este pozo, se hizo un piezómetro de 386 m "La Cabaña", cuyas coordenadas son:
X: 429.660
Y: 4.474.630

Cada punto está en un recinto vallado propio. Estos recintos están separados unos 20 m entre sí.

Las dos primeras estaciones son pozos de bombeo y recarga artificial, con profundidades de 500 m y 700 m, respectivamente.

Por el contrario, el pozo de la estación FE-1R sólo sirve para la recarga artificial, aunque dispone de un grupo electrobomba para realizar los bombeos de limpieza.

Durante la fase de pruebas, se realizaron varios ciclos de recarga artificial en las estaciones de La Cabaña y de Casilla de Valverde.

En la estación de La Cabaña se consiguió recargar artificialmente 430.000 m^3, con un caudal de 45 l/s y en el caso de la estación de Casilla de Valverde con un caudal de recarga 38 l/s, se obtuvo una recarga de 261.000 m^3. Estos resultados fueron muy positivos pero también hay que considerar la pérdida de agua útil para la recarga artificial tras realizar operaciones de limpieza, aunque su porcentaje suele ser pequeño (5-6%).

Además, para controlar la influencia de la recarga artificial en el acuífero, en cada una de las dos estaciones hay instalados un grupo de piezómetros con profundidades de 50, 150 y 300 m.

Se ha observado que en los piezómetros más profundos, los efectos de la recarga artificial en seguida se notan, ya que es la zona más perjudicada por las extracciones de agua, mientras que en los más someros, la influencia de la recarga artificial tardó en llegar varios meses.

Tras esta buena perspectiva, El Canal de Isabel II reserva la recarga artificial como una medida de mejora del acuífero tras una excesiva extracción de agua durante periodos de sequías.

Figura 1-34. Interior de la estación de La Cabaña. Tomado de López-Camacho e Iglesias, Canal de Isabel II, 2007.

Comunidad Valenciana

RECARGA ARTIFICIAL DE LOS EXCEDENTES INVERNALES DEL RÍO BELCAIRE EN CASTELLÓN

La zona de interés está situada en la cuenca hidrográfica del Júcar, subcuenca vertiente del río Belcaire, limitada al norte por la subcuenca del río Mijares y al sur por la del río Palancia.

El área de estudio tiene unos aportes de aguas superficiales escasos y que están concentrados en el tiempo.

Teniendo en cuenta un balance hídrico de la zona para los últimos años, se puede estimar que la suma de los recursos subterráneos renovables y reutilizados es de 9 hm^3/año. Como la demanda media es de 16,82 hm^3/año, se deduce la existencia de una sobreexplotación de 7,82 hm^3/año.

Esta sobreexplotación genera unos efectos indeseables, como la salinización del acuífero por intrusión marina y un empeoramiento de la calidad del agua. Además, debido a una falta en la regulación del agua que circula por el río Belcaire, se advierte que alrededor de un volumen de 6 hm^3/año se vierte al mar sin que se produzca su infiltración en el acuífero.

El objetivo de esta obra construida por AcuaMed (Aguas de las Cuencas Mediterráneas, S.A.), es de conseguir la recarga artificial del acuífero de La Rambleta mediante excedentes del río Belcaire. Para alcanzar este fin, es necesario que la recarga artificial sea continua en el tiempo y con unos caudales relativamente reducidos. Esto implica que es necesaria una regulación que retenga los volúmenes de

avenida que se obtiene gracias a la presencia del sistema cárstico Cuevas de San José.

El lugar donde se va a generar la recarga artificial es el término municipal de Vall d'Uixó, provincia de Castellón.

Los dispositivos de recarga artificial consisten en un azud de derivación en el río Belcaire, inmediatamente aguas abajo de la confluencia entre la rambla Cerverola y el barranco de San José, y desde el que se deriva el agua por una tubería de 1.600 mm de diámetro que llega a Vinambros, donde se sitúa la balsa de regulación de 2 hm^3. Desde esta balsa se continua la conducción de recarga hasta la zona de Els Pedregals, donde se ubican los sondeos para la recarga artificial del acuífero.

Los sondeos están situados al lado del Camí del Pau y están separados entre ellos 100 m. Alcanzan unas profundidades de 100 m. Estos dispositivos tienen un diámetro exterior de 500 mm y uno interior de 250 mm de PVC. También llevan unos piezómetros de PVC de 50 mm.

Figuras 1-35 a) y b). Sondeos y balsa en Vall d´Uixo.

Figura 1-36. Esquema general de los dispositivos para la recarga artificial. Tomado de AcuaMed.

Con todo ello, se estima que la sobreexplotación del acuífero es de 7,82 hm^3/año, por lo que se espera que la recarga artificial reducirá la sobreexplotación en un 26%.

RECARGA ARTIFICIAL EN EL RÍO MIJARES, CASTELLÓN

El río Mijares tiene un proceso de recarga artificial inducida en el acuífero producido por los embalses de Sichar (municipio de Onda) cuyas coordenadas son:

X: 736.176
Y: 4.432.614

Y el de María Cristina (municipio de Alcora) cuyas coordenadas son:

X: 742.908
Y: 4.434.850

Los caudales infiltrados son aproximadamente de 2 m^3/s.

También se produce otra recarga artificial del acuífero en el último tramo final del río.

Cuando hay excedentes en el río, se procura inducir la recarga en los cauces y ramblas, que generalmente están secas, a través de canales de riego. Si se estuviera en el caso contrario, se evitaría mediante la utilización de un canal impermeabilizado.

RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO DE PLANA DE GANDIA-DENIA, SECTOR VERGEL-ELS POBLETS, ALICANTE

El acuífero de Plana de Gandia-Denia está situado en el norte de la provincia de Alicante. Se trata de un acuífero detrítico libre con una potencia media estimada de 27 metros, yacente sobre calizas mesozoicas (Dogger). Existen depósitos aluviales a lo largo del cauce del río Girona, depósitos de glacis y ramblas.

En la caracterización del presente acuífero, se han detectado tres zonas con diferentes transmisividades: una zona con un valor muy alto y que llega a alcanzar los 10000 m^2/día (centro del acuífero), otra zona con valores más bajos en torno a los 3000-5000 m^2/día (zona más cercana al mar) y una tercera zona (hacia el interior) con valores de 500 m^2/día.

La razón principal por la que se ha llevado acabo esta recarga artificial y que fue promovida por los propios regantes ha sido la sobreexplotación. Esta medida ha generado unos beneficios adicionales como la reducción de la intrusión marina y la mejora de la calidad de las aguas.

En cuanto al dispositivo instalado, éste posee dos redes operacionales:

La primera red lleva operando desde 1985 y consiste en una galería (cava) que drena agua desde el río Girona hasta el pueblo de Miraflor, dónde La Comunidad de Regantes de Miraflor la distribuye a través de una red de acequias. Una de estas acequias está conectada a un pozo de recarga artificial (3031-7-0058), con dos galerías horizontales situadas a 21 m de profundidad con longitudes de 110 y 90 m, en el que se vierten los excedentes invernales.

La segunda instalación consiste en un azud para la extracción de agua del río Girona a 200 m aguas arriba de la galería de la primera red y cuya concesión pertenece a La Comunidad de Regantes de Vergel-Setla. El agua es transportada por una red de tuberías para ser distribuida. En el caso que se den excedentes, esta agua es transportada por medio de una tubería de fibrocemento de 300 mm de diámetro, hasta tres pozos de recarga artificial (3031-7-0091, 3031-7-0092 y 3031-7-0093). Los tres pozos alcanzan unas profundidades en torno a los 20 m y constan de varias galerías horizontales. Estos pozos están situados en el término municipal de Vergel, y en el de Els Poblets.

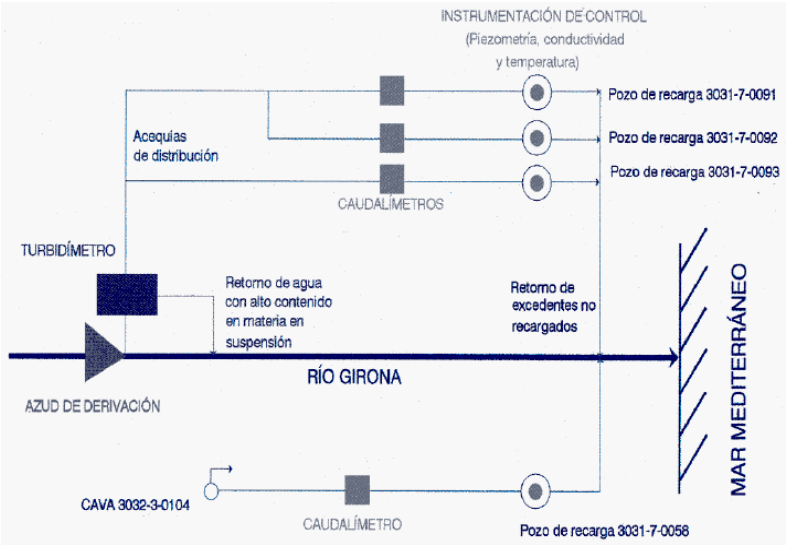


Figura 1-37. Esquema de los dispositivos de recarga artificial. Tomado de Murillo y De la Orden, IGME, 1999.

A continuación están las coordenadas de tres pozos de recarga de este dispositivo:

Nº	Fecha	Huso	X	Y	Z
3031-7-0092	02-feb-07	31	240.291	4.303.142	35
3031-7-0091	02-feb-07	31	240.187	4.303.672	34
3031-7-0058	02-feb-07	31	241.313	4.304.076	30

Tabla 1-07. Coordenadas de los puntos de agua empleados para la AR del acuífero en el sector de Vergel-Els Poblets.

En cuanto al sistema de control del dispositivo de recarga mencionado, se tiene constancia de que se instaló en los pozos sondas para registrar los niveles de agua, temperatura y conductividad del acuífero.

Para conocer los caudales de recarga se instaló un caudalímetro en el pozo 3031-7-0091 pero al parecer ha dado problemas de funcionamiento y sus registros no se han considerado fiables.

Continuando con la red de control, se instaló en los pozos 3031-7-0091 y 92 turbidímetros para poder conocer la concentración en sólidos en suspensión que aporta el agua del río Girona que se utiliza para la recarga artificial. Si se diera el caso en que la concentración en sólidos en suspensión no es aceptable, esa agua se vuelve a desviar hacia el río y no se utiliza para la recarga artificial.

Sin embargo, observando estos pozos, no hay instalados dispositivos de desaireación y, con toda seguridad, el agua se bate en su caída cargándose de oxígeno disuelto que entra en el sistema, con su incidencia directa en la roca caliza.

El vertido directo en forma de cascada de al menos 10 metros provoca un efecto *cascading* y una fuerte aireación. Ambos se traducen en una afección adicional sobre las calizas del acuífero y en la incorporación de finos al sistema cárstico, que podría acumularse en depresiones, tapizar las tuberías y, indudablemente, contribuir a aumentar el grado de colmatación de las aguas.

Como mejora, sería procedente frenar la velocidad de las aguas, tanto en su circuito como durante su caída, intercalando desaceleradores y retardadores que minimizaran su aireación.

Algunas sugerencias adicionales sería el estudio del empleo de sistemas duales, aditivos químicos (técnicas DBP) sobre las aguas de recarga artificial; y técnicas de lavado mediante bombeo inverso o acidificación sobre el medio receptor (acuífero), además de mejorar los códigos de gestión y buenas prácticas

Figuras 1-38 a) a d). Aspecto de los puntos de agua 3031-7-0092, 3031-7-0091 y 3031-7-0058 (2), empleados en la recarga artificial del acuífero. 2 de febrero de 2007.

Tras un modelo matemático que se realizó para analizar la recarga artificial en este acuífero, se ha llegado a la conclusión que sólo un 20% del agua recargada permanece almacenada para su posterior utilización, mientras que el resto es descargado hacia el mar. Esto es debido a su alta transmisividad.

Pese a esto, la técnica de la recarga artificial de acuíferos ha tenido efectos favorables en la zona, tanto a efectos de la recarga artificial, como la mejora de la calidad de las aguas y su bajo coste económico.

RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO DE ORBA, ALICANTE

En la zona de Orba, al norte de la provincia de Alicante, se localizan dos acuíferos conectados hidráulicamente, un aluvial procedente del río Girona y otro de calizas cretácicas parcialmente recubierto por el anterior y que llega a alcanzar en algunos puntos los 500 m de espesor. A muro del acuífero de calizas hay un substrato impermeable formado por margas del cretácico inferior. En cuanto a los parámetros hidráulicos característicos, este acuífero presenta valores de transmisividades de alrededor de 1.500 m^2/día y un coeficiente de almacenamiento de $9x10^{-3}$.

La gran problemática que ha tenido este acuífero fue el aumento de las extracciones de agua por el crecimiento y desarrollo turístico de Calpe, además de tener que suministrar riego a los cultivos cítricos típicos de la zona. Esto generó la sobreexplotación del acuífero y un empeoramiento en la calidad del agua. La situación fue tan grave que una resolución judicial precintó los sondeos que había en este acuífero para el abastecimiento de Calpe.

Por lo tanto, en 1994 la Diputación de Alicante llevó a cabo la construcción de varios diques en el Barranco de Fontilles (arroyo tributario del río Girona) con el objetivo de favorecer la infiltración y aprovechar los recursos generados en momentos de grandes precipitaciones.

El dique principal tiene una altura de 3.9 m y una capacidad embalsamiento de alrededor a los 1900 m^3. La tasa de infiltración unitaria es de 2 m/día (IGME-DPA, 1999), si bien esta medida es menor en la actualidad por efecto de la colmatación, lo que representa un volumen muy exiguo.

Figura 1-39. Dique del Barranco de Fontilles (Alicante).

La ubicación aproximada del dique, sito en las inmediaciones de la urbanización de Paradisorba, con coordenadas obtenidas con GPS monofrecuencia, es:

Nº	Fecha	X	Y	Z
Fontilles	02-feb-07	754.095	4.296.738	121

Tabla 1-08. Ubicación exacta del dique de contención del barranco de Fontiles.

La Diputación también llevo a cabo un modelo matemático que abarcaba un periodo entre 1975 y 1998, para ver la influencia que tendría dicho dique en la zona.

A pesar de que este dique no tiene una gran capacidad para embalsar agua, los resultados fueron favorables, y por consiguiente, la construcción de nuevos diques en la zona puede generar una gran mejora en la situación actual del acuífero.

A parte de los diques existentes en el Barranco de Fontilles, es de interés mencionar la Presa de Isbert, localizada también en este acuífero.

La presa de Isbert es una infraestructura hidráulica ubicada en la cuenca del río Girona. Esta construcción fue finalizada el 1 de enero de 1945 y consiste en una presa de arco

gravedad con una altura desde los cimientos de 29 m y una longitud de coronación de 18 m.

Sus coordenadas UTM son:

X: 751.659
Y: 4.297.224.

Su capacidad de embalse es de 600.000 m^3. Sin embargo, nunca se ha llegado a esta capacidad. La razón de esto, es que la presa está situada en la Sierra del Mediodía que está formada por calizas del Jurásico por las que el agua se infiltra al acuífero. Para hacerse una idea, el embalse suele perder toda el agua embalsada en unos 3 ó 4 días.

Figura 1-40. Aspecto de la presa de Isbert el 2 de febrero de 2007.

A pesar de no cumplir con el objetivo para el que fue construida, la presa ha favorecido la recarga artificial del acuífero, y por tanto la mejora de los recursos subterráneos de la zona.

Por este motivo, la Confederación Hidrográfica del Júcar tiene previsto en su Plan Hidrológico de 1995, el recrecimiento de la presa hasta unos 60 m. Esta modificación actualmente todavía no se ha llegado a realizar y ha encontrado gran oposición de la Plataforma Ciudadana del río Girona por temor a un desbordamiento de la presa en momentos de grandes crecidas del río Girona, como la que ocurrió el 12 de octubre de 2007.

RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO DE JIJONA, ALICANTE

Este acuífero está formado por calizas del Mioceno Inferior con espesores que varían entre 50 y 100 m y en el que se pueden distinguir dos zonas, una libre con una extensión de 9.5 km^2 y otra que confinada con una extensión de 25 km^2 y que es la que más se explota. En cuanto a las transmisividades del acuífero los valores varían entre un rango de 500 a 2000 m^2/día y el coeficiente de almacenamiento se encuentra entre valores de $1 \cdot 10^4$ y $8 \cdot 10^4$.

El principal problema de este acuífero, como el de muchos tantos en España, es que las extracciones por bombeo para suministro de poblaciones y regadío superan a la recarga natural del acuífero, y que junto al clima mediterráneo de la zona que presenta épocas secas, se generan problemas de abastecimiento en Jijona y la sobreexplotación del acuífero.

Para evitar estos problemas el IGME y la Diputación de Alicante (DA) llevó a cabo la recarga artificial del acuífero mediante dos actuaciones.

La primera de ellas consiste en la desviación de agua del manantial de Nuches que es transportada a unos depósitos para el abastecimiento de Jijona.

Cuando estos depósitos están llenos, el agua sobrante se aprovecha para la recarga artificial mediante su inyección en un pozo construido a rotopercusión en 1994.

La segunda infraestructura realizada para la recarga artificial consistió en la construcción de un dique en una cerrada del río Coscón cuyo objetivo es detener la escorrentía superficial y favorecer la infiltración de ésta en el acuífero.

Figura 1-41. Dique en la cabecera del río Coscón. Tomado de Murillo y López-Geta, 2002.

Hay que tener en cuenta que aunque estos dispositivos se realizaron para mejorar la condición del acuífero, éstos dependen mucho de la climatología de la zona, en la que las épocas lluviosas son esporádicas.

Pese a esto, la recarga artificial ha tenido consecuencias favorables para la zona y por lo tanto se debería estudiar actuaciones similares para obtener un aumento de los recursos del acuífero.

RECARGA ARTIFICIAL EN MURLA, ALICANTE

La recarga artificial en Murla consiste en utilizar los excedentes de un acuífero para recargar artificialmente otro acuífero. Los acuíferos en cuestión, son el del Peñón y el de Olivereta.

El primero de ellos es un acuífero kárstico cuya recarga natural por infiltración de lluvia es muy rápida, y su descarga se realiza por varios manantiales como el de Murla. El acuífero de Olivereta también es de naturaleza caliza pero su recarga natural es mucho más pequeña comparada con la del Peñón. Además su situación se ha visto agravada por el aumento de sondeos de extracción.

Para remediar esta situación se llevo a cabo la instalación de un dispositivo de recarga artificial que consiste en utilizar las aguas suministradas por el manantial de Murla para recargar artificialmente el acuífero de Olivereta.

Para conseguir este objetivo, se instalaron dos bombas en el manantial que extraen el agua con un caudal de 15 l/s y lo distribuyen a unos depósitos, para ser posteriormente distribuida por unas tuberías de riego a unos pozos de recarga artificial situados en el acuífero de Olivereta.

Este dispositivo ha sido diseñado para que su funcionamiento sea efectuado durante los meses en los que la demanda es mínima y así aprovechar los excedentes para la recarga artificial.

RECARGA ARTIFICIAL EN AGOST, ALICANTE

Según la empresa Aquagest Levante, se está llevando a cabo varias actuaciones de recarga artificial del acuífero Ventós-Castellar, dentro del término municipal de Agost.

Este acuífero libre es de naturaleza kárstica y presenta transmisividades con un rango de valores que se encuentra entre 2.900 y 4.800 m^2/día.

Es un acuífero que depende mucho de las precipitaciones regionales y es la principal “fuente” para el abastecimiento de Agost.

Debido a las excesivas extracciones que se llevan realizando en las últimas décadas, los niveles piezométricos han diminuido significativamente, como se puede ver en la siguiente gráfica:

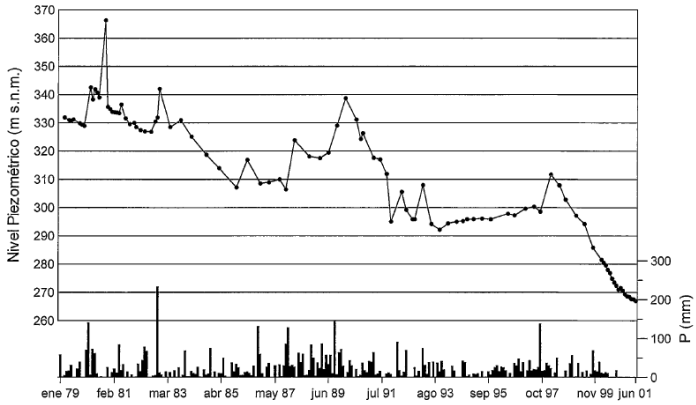


Figura 1-42. Variación piezométrica registrada en un sondeo del acuífero durante el periodo 1979-2001. Tomado de Andreu y Pulido-Bosch, 2001.

Por este motivo, Aquagest Levante ha llevado a cabo la construcción de una serie de presas junto a plataformas de infiltración para conseguir remediar esta situación, además de reducir el riesgo de inundaciones durante periodos torrenciales.

RECARGA ARTIFICIAL EN TORREMANZANAS, ALICANTE

El abastecimiento del municipio de Torremanzanas se realiza mediante las aguas subterráneas provenientes de tres pequeños acuíferos de naturaleza caliza (Cenomaniense-Turonense) y cuaternarios situados en la zona.

El primero de ellos es el de Rentonar y tiene una extensión de 2 km^2, el segundo es el de Canaleta con una extensión de 0,5 km^2 y el último el de Masets-Alcoyes con un área de 4 km^2.

Estos acuíferos se recargan por infiltración de la lluvia y su descarga se realiza a través de una serie de manantiales a parte de los sondeos de abastecimiento para Torremanzanas.

Desde hace tiempo, el municipio de Torremanzanas utiliza los excedentes provenientes del acuífero de Canaleta para recargar artificialmente mediante una serie de balsas de infiltración el acuífero detrítico de Massets-Alcoyes. Esta gestión de las aguas genera la continuación de suministro de agua por parte de la fuente Mayor (Torremanzanas) durante los meses de verano.

Comunidad de Murcia

EXPERIENCIA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA RECARGA ARTIFICIAL EN TOTANA, MURCIA

La Confederación Hidrográfica del Segura ha autorizado a Perga Ingenieros, S.L realizar un proyecto de recarga artificial del acuífero para obtener energía eléctrica.

El proyecto consiste en la realización de dos sondeos separados entre ellos unos 100 m, con unos diámetros entre 200-250 mm, y que llegarán a unas profundidades de 150-200 m.

El agua será extraída por un sondeo por medio de un grupo de electrobombas, y conducida por una tubería enterrada hasta un colector situado en el Centro de Investigación Energético a partir del cual se obtiene el aprovechamiento del calor latente del pozo.
Posteriormente, el agua es devuelta al acuífero por medio del segundo pozo mediante un equipo de bombeo que funciona de manera inversa. De esta manera, se obtiene energía sin agotar la materia prima (el agua) ni el acuífero.

Las coordenadas son:

X: 630.452,61
Y: 4.182.114,74

Castilla La Mancha

RECARGA ARTIFICIAL EN EL CANAL DEL GUADIANA, CIUDAD REAL

El cauce del río Guadiana circula en su mayor parte por el acuífero 23 o Unidad hidrológica 04.04 La Mancha Occidental, cuya extensión es de 5.500 Km^2**,** distribuida entre las provincias de Ciudad Real, Cuenca y Albacete. Este acuífero es de naturaleza cárstica. Las aguas subterráneas de esta zona se caracterizan por una gran dependencia con las superficiales y esto ha generado importantes humedales como el ya conocido Parque Nacional de Tablas de Daimiel.

La gran problemática de este acuífero comenzó con la política de 1950, en la que prevalecía la agricultura de regadío sobre la de secano. Esta situación se incrementó durante los siguientes años y conllevó a la declaración provisional de sobreexplotado en 1987 y a la definitiva en 1994. Para poder solucionar esta situación, aparte de intentar reducir las extracciones, se han llevado a cabo varias actuaciones de recarga artificial.

Se construyeron siete pozos de recarga artificial en las cercanías del desagüe de la presa de Peñarroya. Como dato ilustrativo, el volumen de agua infiltrado hasta marzo de 1997 era de 1 hm^3.

También se realizó la regulación del río Cigüela mediante las compuertas situadas en el molino de Molemocho, (Parque Nacional de las Tablas de Daimiel). Estas compuertas derivan los excedentes del Cigüela en sentido contrario hacia el cauce del río Guadiana, y así favorecen la infiltración del agua en el acuífero. Para hacerse una idea, en los años 96/97 la recarga artificial estuvo alrededor de los 20 hm^3 y en los años 97/98 se llego a obtener una recarga de 60 hm^3.

Sin embargo, las actuaciones más importantes han sido la construcción de una serie de pozos de recarga artificial a lo largo del cauce del río Guadiana.

Las últimas construcciones de estos pozos se llevaron a cabo en 2010 debido a las extraordinarias lluvias sufridas en este año. Los pozos antiguos, construidos en 1997, recargan artificialmente el acuífero con unos caudales que varían entre los 30, 40 y 70 l/s, aunque la media está en los 50 l/s, mientras que los nuevos alcanzan unos caudales de 100 l/s.

Figuras 1-43 a) y b). Pozos de la batería del canal del Guadiana, Ciudad Real. a) Pozos de 1997. Fotografía tomada en el 2006; b) Pozo realizado en 2010.

Andalucía

CAREOS DE LAS ALPUJARRAS

Las acequias de careo o simas de careo o guiadero, como las designan los pobladores de las Alpujarras, son acequias de fondo permeable cuyo origen se remonta a la ocupación árabe (siglos XIII a XV).

En la actualidad existen, al menos, 23 acequias de careo operativas en la falda de Sierra Nevada (Granada y Almería), acequias que canalizan y distribuyen las aguas del deshielo de los ventisqueros para la recarga artificial de acuíferos (Cano-Manuel y González Ayestarán, 2000). A pesar de que se pueden considerar antecedentes, se ha decidido situarlas en este apartado por que su operatividad continúa.

En torno al año 2000 los gestores del Parque Nacional de Sierra Nevada completaron el inventario de acequias de careo o guiadero, georreferenciando 23 acequias y llevando a cabo 36 intervenciones en varios tramos de ellas, al menos siete de careo, incrementando su efectividad sin perder su originalidad. Estas obras fueron ejecutadas por el Grupo Tragsa, lo que ha permitido conocer con detalle algunos aspectos de interés acerca de los careos; y de entre todos ellos, seleccionar algunos especialmente relevantes y representativos para llevar a cabo un estudio más detallado.

Las acequias de careo seleccionadas fueron las de Mecina-Bombarón, población que cuenta con un sistema de gestión de las aguas que conserva costumbres y tradiciones de sus constructores.

Figuras 1-44 a) y b). Fuente de San Miguel y Fuente de la Plaza Vieja, en Mecina-Bombarón (Granada). Según información verbal tienen conexión hidráulica con las acequias de careo.

Aunque su origen se remonta, al menos al año 1139 (Espinar Moreno, 1988), su empleo, como ya se ha mencionado, alcanzó cotas máximas en los últimos siglos de la época musulmana, siglos XIII a XV, cuando fue desarrollado un intrincado sistema de canalización y acequias para el aprovechamiento máximo del agua (Díaz Marta, 1989).

Los careos aprovechan el agua del deshielo gota a gota, viene desde los 3.000 m de altitud y llega por las acequias a los campos, donde es desparramada por el acequiero.

El sistema de reparto del agua se lleva a cabo con compuertas en la cabecera de las acequias, en la falda de la sierra por encima de 2.300 m. El agua derivada es desparramada por el acequiero por campos de labor (que ellos llaman simas) con un "legón" para incrementar la tasa de infiltración, de modo que se infiltran en el acuífero en una extensión bastante corta.

Los regantes tienen un buen control de las zonas donde interrumpir la acequia y provocar derivaciones y "riego" a manta, con objeto de alimentar las balsas existentes por encima del pueblo y las fuentes del mismo, así como incrementar el volumen en la cabecera del acuífero.

Algunas acequias terminan en simas. Al parecer se trata de echar el agua en fallas conectadas con manantiales, ya que hay una tupida red de fracturación.

A continuación se describe la geología del entorno de las acequias y los dispositivos existentes en la actualidad.

Figuras 1-45 a) y b). Desparrame del agua de la acequia de Horcajo y derivaciones para el “riego” a manta, para alimentar las balsas existentes por encima del pueblo.

Analizando la geología por donde discurren estos careos, se sabe que no es un acuífero propiamente dicho. Se trata más bien de un macizo cristalino con una marcada red de fracturas y un regolito superficial por alteración del macizo rocoso, donde, en ocasiones, se ha desarrollado un suelo con varios horizontes edáficos. De este modo, no se puede hablar de un acuífero en sentido estricto, sino más bien, de un sistema de conducción de agua con escasa capacidad de retención relacionada con las fracturas del terreno y el flujo en la interfase suelo-roca.

Para estudiar su efectividad se ha realizado la superposición en un GIS de la red de acequias de careo sobre la cartografía geológica del área, añadiendo además otras coberturas geográficas.
Las distintas litologías por las que discurren las acequias de careo son:

1) Afloramientos calcáreos, con abundancia de simas y sumideros kársticos.

2) Zonas de alteración superficial del macizo metamórfico, donde el regolito adquiere potencialidad acuífera (Castillo et al, 1996).

3) Acuíferos detríticos cuaternarios de diversas tipologías (piedemontes, etc.), bajo los cuales subyacen formaciones calcáreas o bien metamórficas de baja permeabilidad (en general filitas, esquistos y calcoesquistos).

En esta figura se observa la tendencia general a construir acequias de careo desde los cauces fluviales que drenan Sierra Nevada.

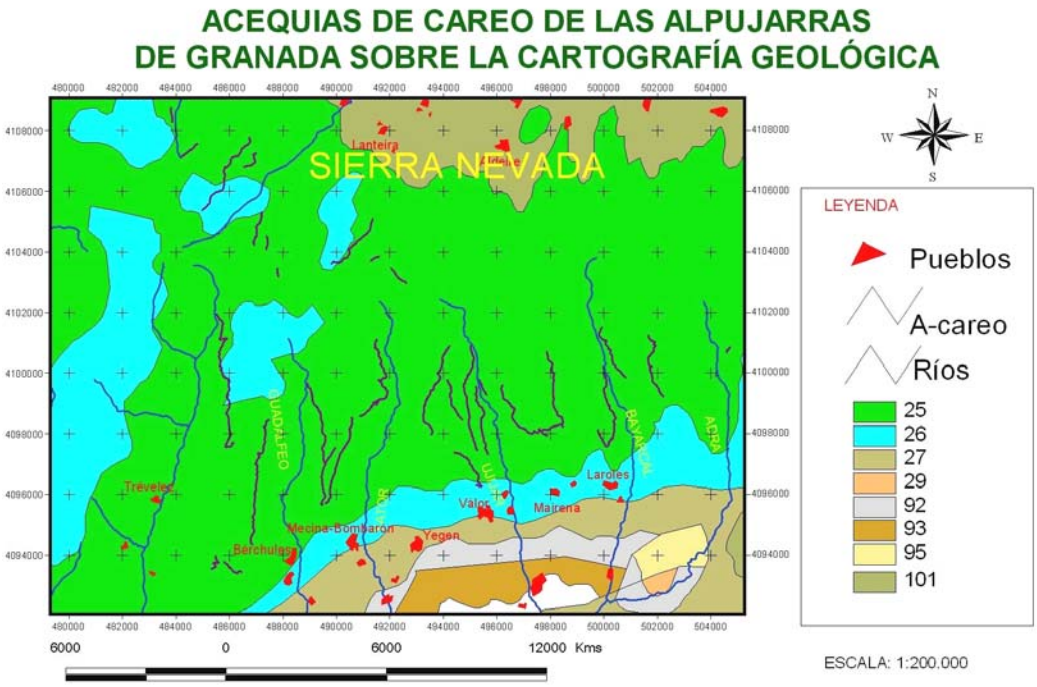


Figura 1-46. Acequias de careo y cartografía geológica.

LEYENDA:
25.- Micaesquistos grafitosos con granates (M. del Veleta)
26.- Anfibolitas, serpentinitas, micaesquistos, y mármoles (M. del Mulhacén)
27.- Gneises, migmatitas, micaesquistos, esquistos, filitas, mármoles, calizas, y dolomías (M. Alpujárride)
29.- Dolomías, areniscas, conglomerados, arcillas, y margas
92.- Conglomerados, calizas y margas.
93.- Conglomerados, areniscas, arcillas, calizas y yesos
95.- Conglomerados, calcarenitas, calizas arrecifales, areniscas y margas con niveles turbidíticos
101.- Conglomerados, gravas, arenas, areniscas, limos y arcillas. Terrazas fluviales y marinas.

Según el inventario del año 2000 (en Cano-Manuel y Grupo Tragsa, 2000), las acequias de careo son más frecuentes e importantes en la parte oriental de Sierra Nevada, zona donde se localizan las menores altitudes de la cordillera, y por tanto, se recogen menores precipitaciones. Por consiguiente, la necesidad de regulación del agua es mayor. Según la función que desempeñan, encontramos dos tipos dos tipos de acequias:

- Acequias de careo: Facilitan la infiltración del agua. Para ello, el agua de los ríos y/o arroyos, se “carga” por estas acequias durante el invierno y la primavera, y se conduce a unas zonas más o menos llanas donde se deja que se infiltre. Cada acequia tiene sus áreas de recarga llamadas *simas* o *cimas*.

Figuras 1-47 a) y b). El agua, procedente de los ventisqueros, es conducida por acequias y sistemas de compuertas a los careos en un sistema de turnos.

- Acequias de riego: Transportan el agua, generalmente desde los cauces fluviales a sistemas abancalados (Navarro Pérez, 1983). En estas acequias la infiltración también tiene gran importancia.

Todavía en la actualidad, y desde el periodo musulmán, permanece la figura del acequiero como encargado de la gestión desde el periodo musulmán y única persona autorizada para controlar las compuertas (Al- Mudayna, 1991 y Vidal, 1995).

Se han catalogado y definido un total de 23 acequias de careo dentro de las 127 inventariadas. Se ha calculado la longitud total de las acequias careo en el transcurso del presente trabajo, que asciende a 125.224 metros.

Nombre	Río de la toma	Comunidad de regantes	Observaciones
Del Espino	Chico de Bérchules	SI	Bien conservada
Bérchules	Trevélez	SI	Algo abandonada
Mecina	Grande de Bérchules	SI	Bien conservada Problemas de estabilidad Abastecimiento urbano
De la Mogea	Nechite	SI	Bien conservada
Del Horcajo	Mecina	SI	Bien conservada
Yegen	Mecina	SI	Hormigonada casi en su totalidad Riego y careo.
De los Vadillos	Valor	SI	Bien conservada
Del Monte	Valor	SI	Bien conservada Riego y careo
De la Loma	Valor	SI	Bien conservada De tierra.
De la Fuente del Espino.	Nechite	SI	Bien conservada
Del Boy	Laroles	SI	Bien conservada Al inicio hormigonado y el resto es de tierra
Nueva de Bayarcal	Bayarcal	SI	Muy bien conservada.
De las Hoyas	Andarax	SI	Bien conservada Pequeña acequia de tierra
Del Pecho	Andarax	SI	Bien conservada Pequeña acequia de tierra
Del Maguillo	Río del Pueblo	SI	Bien conservada Hay una pista a lo largo de gran parte de su recorrido
Del Prado Llano	Río del Pueblo	SI	Bien conservada
Del Prado Largo	Río del Pueblo	SI	Bien conservada
De careo de Beires	Andarax y Ohanes	NO	Bastante descuidado Problemas graves de estabilidad
Del Garbanzal	Ohanes	NO	Conservación regular
Del Canal	Ohanes	NO	Bien conservada En parte aprovecha un antiguo canal de una central hidroeléctrica.
De Tices	Ohanes	SI	Un poco descuidado
del Corazón	Alhorí	SI	Abandonada recientemente.
Del Jaral	Alhorí	SI	Bien conservada

Tabla 1-09. Inventario de acequias de careo, con una longitud total de 125.224 metros.

Las acequias de careo consideradas más emblemáticas por su tamaño y grado de preservación son:

Acequias de Mecina-Bombarón. Dispone de un sistema de acequias muy bien desarrollado. La acequia de Mecina es la mayor acequia de careo de toda Sierra Nevada. En su recorrido se pueden encontrar cerca de 20 simas donde se reparte el agua (Cara, 1989; Ben Sbih y Pulido Bosch, 1996).

Acequias de Trévelez. Buen estado de conservación (Delaigue, 1995) y con escasa presencia de "nuevos materiales" empleados en labores de mantenimiento.

Acequias de Bérchules. Dispone de grandes acequias de riego y dos de careo.

Acequias de Valor. La Comunidad de Regantes gestiona tres acequias de careo: acequias de los Vadillos, de la Loma y del Monte. Los careos se emplean para el abastecimiento de la población.

Figuras 1-48 a) a d). Campo de infiltración o sima por derivaciones de la acequia de Los Llanillos. Fotografías del 20 de abril de 2007.

Las acequias de careo y el tratamiento del agua constituyen un sistema tradicional de gestión hídrica único en el mundo, que apenas ha variado en ocho siglos y que aporta

un alto grado de experiencia y bagaje aplicables a los esquemas actuales de gestión hídrica.

La recarga del "acuífero" se lleva a cabo desparramando el agua de las acequias por terrenos bien conocidos por los regantes, que coinciden con suelos bien desarrollados o con sistemas de fracturas, en las que se infiltra el agua y discurre "aguas abajo" hacia las balsas, fuentes y partes inferiores de la red de fracturación, ya que parece haber una intensa fracturación del macizo rocoso y buena conexión entre fallas.

La técnica empleada por los moriscos de las Alpujarras fue, según testimonios de los regantes, el empleo de trazadores y el "ensayo y error". Durante varios años echaron "colorantes" en algunos tramos de acequia, percibiendo en un periodo de retorno indeterminado que el agua coloreada llegaba a las fuentes de los pueblos, etc. Estos conocimientos fueron trasmitidos durante generaciones, que fueron haciendo crecer el conocimiento de las conexiones entre las fracturas de la falda de la Sierra.

Se ha constatado además en campo la presencia de borbotones en el suelo aguas abajo de la acequia o sima de Horcajos, a unos 1.800 m de altitud, que podrían ser atribuibles a un flujo por la interfaz suelo-roca, flujo bastante heterogéneo a medida que varía el espesor del suelo desarrollado.

El principal problema es que los procesos geodinámicos en la falda de la Sierra, con pendientes tan elevadas y tanta altitud conlleva el deterioro acelerado de las estructuras, de ahí que en general, los careos requieren un alto mantenimiento.

Los procesos que más les afectan son los relacionados con movimientos de ladera, caída de sólidos que taponan o rompen los conductos, embalsamientos, acarcavamientos, erosión remontante, etc.

Seguidamente se comentan algunas actuaciones de mantenimiento y recuperación representativas de los problemas que afectan a las acequias de careo y no tanto a las de riego o transporte, de lecho menos permeable.

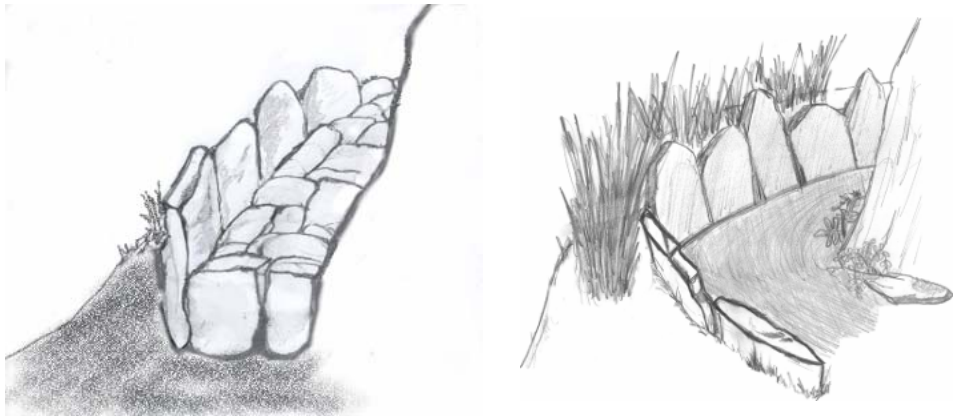
Figuras 1-49 a) a c). Acequia de Horcajo, campo de infiltración y aspecto de los borbotones que se originan ladera abajo. 20 de abril de 2007.

Cabe destacar que el mantenimiento se lleva a cabo, en general, por métodos tradicionales. A este respecto los regantes comentan que en 1995 construyeron 300 albarradas aguas arriba, empleando acémilas para ello. En la construcción intervinieron incluso varias mujeres del pueblo, dado el escaso presupuesto con que contaban (unos 8.000 €).

La colocación de las piedras constituye el elemento clave en la construcción de las acequias. Al ser rocas metamórficas, la piedra es alargada en general, y su elaborada disposición permite incrementar la impermeabilización, el drenaje con escasas pérdidas, la distribución, proteger las laderas, reducir la erosión, etc.
El sistema de trabajar y colocar la piedra ha pasado de padres a hijos durante generaciones, y los regantes de las Alpujarras conocen criterios constructivos de *mampostería hidráulica* muy bien desarrollados y aplicados para su contexto específico.

Las tareas de recuperación más importantes que se vienen realizando gestionadas y financiadas por el Parque Nacional y ejecutadas por el Grupo Tragsa desde 1999 son las siguientes:

- Excavación de la solera del canal y la introducción de piedras (Ayuso et al, 1986) enterradas (Rodríguez de Velasco, 1993 y Medina, 1996) en su mayor parte en la tierra y protección de los bordes del canal con lajas.



Figuras 1-50 a) y b). Dibujos de mampostería hidráulica por cortesía de Cano-Manuel y del Grupo Tragsa de Granada). a. Estructura del canal protegido por piedras enterradas en tramos de gran pendiente y sujetos a un fuerte desgaste b. Lajas protegiendo el borde exterior del canal.

- Ensanche del canal en puntos específicos y ampliación de la longitud de la acequia aumentando así la superficie de infiltración y construcción de canal de tierra, mediante la apertura de una zanjas, favoreciendo la recarga artificial del acuífero por infiltración directa en dispositivo tipo fosa.

Figuras 1-51 a) y b). Aspecto de los palates o pequeños bancales para la estabilidad de la ladera y protección de los caminos en la acequia de Mecina reconstruidos por el Grupo Tragsa en el año 2000 para el Parque Nacional de sierra Nevada. Fotografías del 21 de octubre de 2006.

Figuras 1-52 a) y b). Mampostería hidráulica en la Sima del Tejar. Fotografías del 21 de octubre de 2006.

- Regularización de la pendiente para evitar embalsamientos en zonas no deseadas y construcción de acueducto de mampostería en los puntos donde las acequias atraviesan barrancos en los que pierden gran cantidad de agua.

Figuras 1-53 a) y b). Acueducto de mampostería y recuperación de pasos en la Sima del Tejar dentro de los límites del PNSN a unos 1.800 m de altitud. Fotografías del 21 de octubre de 2006.

Tras lo explicado, se llega a la conclusión que las acequias de careo constituyen un sistema de recarga artificial de acuíferos específico basado en la tradición y en el legado de padres a hijos durante generaciones, quienes han ido ampliando el conocimiento del funcionamiento del acuífero, especialmente en cuanto a las áreas de recarga principales y de drenaje, y su relación con la red de fracturas del macizo rocoso

y el desarrollo de suelos. Por lo tanto, resulta importante preservar y mantener estos sistemas de acequias de careo, dado su alto valor histórico y medioambiental, recurriendo si es preciso a la externalización de los gastos en concepto de costes ambientales.

GESTIÓN DE LA RECARGA EN LA EXPLOTACIÓN MINERA DE COBRE LAS CRUCES (SEVILLA)

El proyecto de la mina de Las Cruces comenzó en 1990, cuando Riomin Exploraciones, S.A solicitó varios derechos mineros para explorar la zona y que fueron otorgados en 1992.

En mayo de 1994, se llevo a cabo el primer sondeo exploratorio de la anomalía de gravimetría existente en la zona que condujo al descubrimiento del yacimiento de Las Cruces, uno de los yacimientos de más alta riqueza en cobre del mundo.

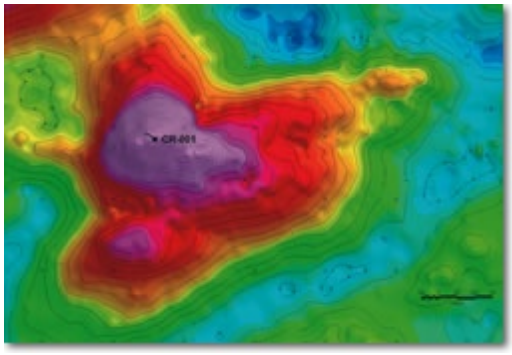


Figura 1-54. Mapa geofísico: la anomalía geofísica (color violeta) señala el yacimiento mineral de Las Cruces en profundidad. CR001: primer sondeo exploratorio. Tomado de CLC.

Tras la fase de investigación y ya realizado un estudio de pre-viabilidad, el proyecto de esta mina fue adquirido en 1999 por MK Gold Company (ahora MK Resources Company), subsidiaria de la estadounidense Leucadia National Corporation. Riomin Exploraciones también cambió su nombre a Cobre Las Cruces, S.A. (CLC). En realidad, la titularidad del proyecto pertenece al mayor accionista, que en este caso es Inmet Mining Corporation, compañía minera canadiense que produce minerales metálicos como cobre, zinc y oro a nivel en España, Turquía, Finlandia y Canadá y tiene intereses mineros en Papua-Nueva Guinea y en Panamá.

La Mina de las Cruces está situada en Gerena, a 10 km. de Sevilla y consiste en un yacimiento de la Faja Pirítica, localizado a 150m de profundidad y que consiste en sulfuros masivos encajados entre materiales paleozoicos y neógenos de la Depresión del Guadalquivir, donde la mineralización se encuentra en *stockwork*. La producción de está mina se concentra sobre todo en Cu pero también en Au, Ag, Zn y Pb que están en el gossan que hay por encima del yacimiento.

Las reservas extraíbles probadas y probables del yacimiento son de 17,6 millones de toneladas de mineral, con una elevada concentración de cobre en el mineral (6,2%), cuya producción media anual que se espera obtener será de 72.000 toneladas de cobre, con una duración prevista de 15 años.

Las coordenadas exactas de la corta de la mina son:

Huso 29
X: 757.269
Y: 4.154.787

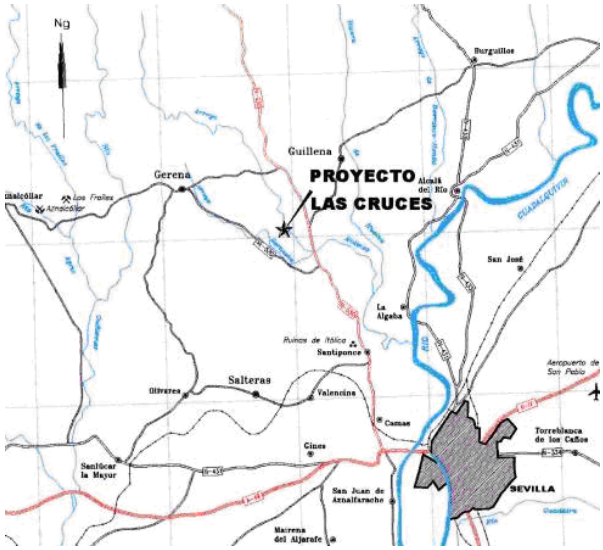


Figura.1-55. Localización de la mina de Las Cruces. Tomado de: CLC.

Uno de los grandes inconvenientes ambientales de la explotación de este yacimiento a cielo abierto consiste en que los sulfuros masivos se encuentran a muro del Acuífero confinado de Niebla-Posadas (UH 05- 49).

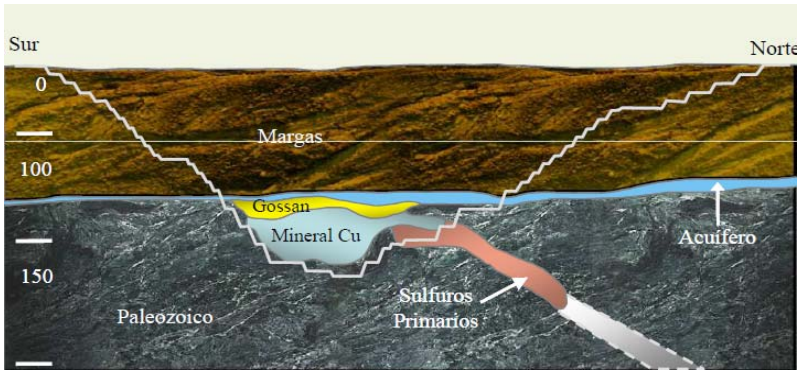


Figura 1-56. Corte geológico de Las Cruces. Tomado de CLC.

Analizando las características del presente acuífero, se pueden destacar varios aspectos:

- El espesor del acuífero oscila 10-15 m., aunque los sondeos de investigación han identificado una zona que cubre en parte el depósito mineral que se extiende hacia el Sur y Este, donde el acuífero tiene menor espesor (0-10 m) y otra segunda zona más alejada, al Noreste y Este del depósito (sector Rivera del Huelva), donde el acuífero presenta mayor espesor (20-30 m.)
- La permeabilidad es mayor debida a una intensa fracturación de los materiales paleozoicos que rodean el yacimiento, así como la propia fracturación que presenta.
- Sobre el sustrato impermeable de edad paleozoica (límite norte del acuífero), se disponen los materiales permeables del acuífero formados por conglomerados, gravas, arenas y areniscas con intercalaciones de arcillas de edad Miocena. Estos materiales se hunden hacia el sureste, pasando lateralmente a arcillas, bajo las margas azules miocenas del Guadalquivir que forman el techo y limite sur del acuífero.
- Los parámetros hidráulicos son muy variables, tanto la transmisividad como el coeficiente de almacenamiento, y varían considerablemente según la zona del acuífero. Los descensos estacionales pueden llegar a ser de hasta 15-20 m y los caudales de bombeo son del orden de 50-80 l/s o 26 hm3/año utilizados destinados para regadío y abastecimiento. La aportación subterránea se estima entre 35-42 hm^3/año.
- La recarga del acuífero tiene lugar por infiltración directa del agua de lluvia sobre la superficie aflorante y por infiltración de la escorrentía superficial desde el Paleozoico aflorante, aunque esta no tiene lugar en toda la línea de contacto. En las condiciones originales la descarga se realizaba a través de los ríos y arroyos, que cruzan a los afloramientos del acuífero, así como de pequeños manantiales, situados entre los materiales acuíferos y el material impermeable de techo en la franja del acuífero libre. En la zona de acuífero, la descarga se realiza actualmente a través de sondeos.
- Las aguas subterráneas procedentes de este acuífero Niebla–Posadas son, en general, de facies bicarbonatada cálcica en el área próxima al sector de recarga; cloruradas sódicas en el sector próximo a Guillena y bicarbonatada-sulfatada calco-sódica hacia el sur y sureste. En general, la calidad del agua subterránea es mejor cerca de la zona de recarga natural del acuífero (afloramiento de las arenas/areniscas del Mioceno de base y Paleozoico fracturado, al Norte del área del Proyecto) que en el resto.
- La mineralización de las aguas aumenta desde los afloramientos y sus proximidades (400-550 μS/cm.) hacia zonas más profundas y alejadas (2.000–4.500 μS/cm), coincidiendo con una evolución del pH del agua (7,2 en torno al afloramiento y 6,3 en profundidad y alejadas). En el entorno del yacimiento el agua subterránea es normalmente alcalina (pH: 8,3) con una conductividad media de 1.400 μS/cm. El agua procedente del sector de Matahijas muestra peor calidad, con alta concentración salina (4.600 μS/cm.). El agua presenta, en general, una dureza media de 235–335 mg/l $CaCO_3$.
- Los estudios isotópicos indican que las aguas subterráneas están sujetas a cierta evaporación antes de la recarga (2H/18O), confirmándose, mediante el análisis de la actividad en tritio (3H), que es prácticamente nula la recarga vertical del acuífero,

a través de las margas.

- Con respecto a la edad el agua subterránea en las inmediaciones de Gerena es difícil de precisar, al ser una mezcla de aguas antiguas y recientes, mientras que al Sur y Sureste de Las Cruces, esta edad es superior a 40 años.

Para realizar la explotación a cielo abierto del yacimiento de Las Cruces mantener y preservar la calidad de las aguas subterráneas es necesario deprimir el nivel de agua del acuífero por debajo de la cota de excavación para evitar la contaminación de dicho acuífero.

Además de este principal objetivo, con la técnica de la recarga artificial se pretende reducir la presión de poros en las margas, desaguar el fondo de corta, y aplicar la reutilización de las aguas.

Para poder alcanzar estos objetivos, CLC (Cobre Las Cruces, S.A.) ha instalado un sistema de drenaje e inyección que consiste en un anillo de sondeos periféricos a la corta que deprimen el nivel piezométrico del acuífero, otro anillo de sondeos conectados a los primeros y que tienen como función la reinyección del agua extraída con anterioridad para ser devuelta al acuífero y una serie de sondeos en la corta que drenan el agua que ha escapado de los pozos de drenaje.

CLC también está obligada a garantizar la calidad del agua que se devuelve al acuífero, por lo que actualmente la empresa está construyendo una planta de tratamientos permanente que entrará en funcionamiento en el último trimestre del 2010. Mientras tanto, CLC tiene instaladas varias plantas de ósmosis inversa para garantizar este objetivo.

La configuración básica de las instalaciones del sistema drenaje-reinyección para la recarga artificial consisten en los dispositivos siguientes:

- Sondeos de drenaje y sondeos de reinyección.
- Tuberías de conexión entre ambos tipos de sondeos.
- Cálculos hidráulicos.
- Suministro de energía.

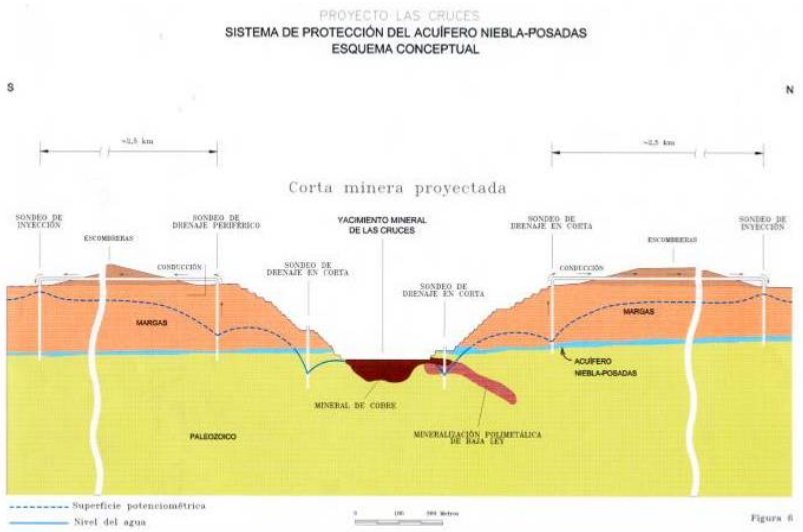


Figura 1-57. Sistema de protección del acuífero Niebla-Posadas. Esquema conceptual. Tomado de CLC.

Antes del comienzo de la explotación y de la realización del desmonte de las margas fue necesario un drenaje previo del área afectada por la explotación mediante bombeos por sondeos de drenaje perimetral y drenaje en corta (sumidero) con dos objetivos principales:

- Asegurar la estabilidad de los taludes de la corta en las margas.
- Evitar contaminación en las aguas subterráneas al prevenir el contacto de dicha agua con el mineral de interés.

Al realizar este descenso del nivel piezométrico y el requerimiento de mantenerlo a dicho nivel durante la vida de explotación de la mina puede afectar a otros usuarios de este acuífero ya que se generaría un cono de descenso de gran extensión. Para evitar este problema, como ya se ha comentado con anterioridad, se ha diseñado un sistema de drenaje y reinyección por sectores de manera que toda el agua que es extraída es reinyectada a una distancia variable según los sectores del acuífero donde se ha extraído.

Esta distancia que hay entre los sondeos de drenaje y reinyección son de 900 m para los sectores 3 y 7, de 1.200-1.500 m en los sectores 1, 2 y 8 y de 2.500-3.500 m en los sectores 4, 5 y 6.

El sistema está diseñado para funcionar de manera continua, evitando sobrepasar el tiempo de transito de 3 horas entre su drenaje y reinyección (dada la longitud máxima de conducción es de 6 km. y la velocidad de flujo de 1 m/s).

A medida que se avance en la corta (Este- Noreste) CLC deberá ir reubicando los sondeos de acuerdo con las fases de explotación que tienen previstas.

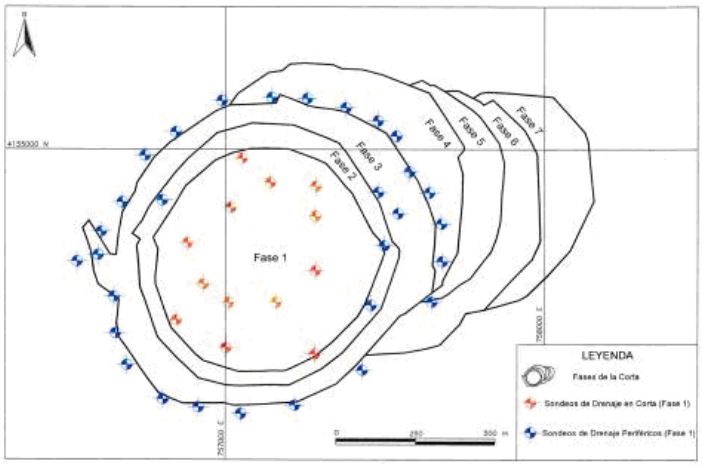


Figura 1-58. Fases previstas en el proyecto de explotación para el avance de la corta. Tomado de CLC.

A continuación se va exponer en detalle cada unos de los dispositivos esenciales de este Sistema de Drenaje-Reinyección:

Sondeos de drenaje y sistema de bombeo

Los sondeos de drenaje captan el agua que atraviesan el acuífero detrítico y la franja superior del Paleozoico (zona fracturada y meteorizada) e interceptan el flujo del agua subterránea en la corta. La ubicación de estos está diseñada para que obtengan la máxima cantidad de agua posible antes de que este flujo de agua alcance la corta. El número de sondeos de drenaje podrá alcanzar un máximo de 43 en el décimo año de explotación del yacimiento.

También existen sondeos de drenaje perimetrales (de 20 a 30) agrupados en ocho sectores, y están encargados de drenar la mayor parte del agua subterránea para reducir al mínimo la entrada de agua subterránea a la corta, y sondeos de drenaje interiores (aprox. 13), que capturan el agua subterránea que no es interceptada por los drenajes perimetrales. Estos últimos sondeos solo atraviesan litologías paleozoicas.

	Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5	Sector 6	Sector 7	Sector 8
Nº sondeos	9	5	7	9	7	3	2	1
Caudales extracción (l/s)	53,99	27,99	43,99	45,00	45,00	4,51	4,00	5,00

Tabla 1-10. Tabla que muestra los sondeos existentes en la zona y los caudales de extracción correspondientes a cada uno de ellos. Tomado de CLC, 2005.

En cuanto a las características y funcionamiento, cada sondeo de drenaje perimetral dispone de una bomba sumergible multifásica de eje vertical con variador de frecuencia

capaz de realizar el drenaje, la conducción e inyección con una presión de 12 bares. En la boca de cada sondeo de drenaje, instaladas en la tubería de impulsión en la embocadura del sondeo, se dispone de:

- Grupo moto bomba-sumergible, con centrador y válvula de retención.
- Manómetro.
- Presostato.
- Válvula de aireación.
- Válvula de regulación y cierre.
- Filtro de retrolavado de finos.
- Contador Woltman.
- Válvula y sistema de desagüe.
- Grifo toma-muestras.
- Tres sondas guarda-nivel.
- Sistema de alimentación y protección eléctrica en armario anexo.

Figura 1-59. Sondeo tipo de drenaje perimetral.

Los sondeos de drenaje se agrupan en ocho sectores conectados directamente con ocho grupos de sondeos de reinyección. La conducción entre ambos tipos de sondeos se realiza mediante conducciones PEAD herméticas y presurizadas para evitar la oxidación del agua.

Sondeos de reinyección

Toda el agua que es captada por los sondeos de drenaje es reinyectada en el acuífero mediante sondeos de reinyección instalados en el acuífero entre 1 a 3 km de distancia desde la corta.

Para la comprobación de la red de drenaje-reinyección fuera técnicamente viable, CLC realizó cinco ensayos de reinyección con resultados favorables.

Reinyección	Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5	Sector 6	Sector 7	Sector 8
nº sondeos	8	5	4	4	6	4	4	2
caudal tipo por sondeo en l/s.	5.0 a 11.0	11,00	15,00	15,00	11,00	5,00	5,00	5,00

Tabla 1-11. Ubicación por sectores y caudales tipo, de los sondeos de reinyección. Tomado de CLC.

La construcción de un sondeo de reinyección es similar a la de los sondeos de drenaje perimetral, contando con una tubería ranurada en las areniscas del terciario y en la formación paleozoica fracturada, aislando el acuífero de la formación confinante mediante cementación a presión y colocación de tapones de bentonita.

Las conducciones de inyección en los sondeos han sido calculadas para velocidades de paso entre 1 y 1,3 l/s.

Previo al propio sondeo, se dispondrá de una arqueta estanca de 1,15 x 0,90 m^2 al que llegará la tubería de PEAD procedente del sistema de drenaje, pasando a una tubería de fundición dúctil de impulsión en el sondeo.

En el emboquille de cada sondeo se instalará:

- Válvula antirretorno.
- Manómetro.
- Presostato.
- Válvula de aireación.
- Válvula de regulación y cierre.
- Filtro de retrolavado de finos.
- Contador Woltman.
- Válvula y sistema de desagüe.
- Grifo toma-muestras.
- Sistema de alimentación y protección eléctrica en armario anexo.

Como el agua que se reinyecta procede del acuífero y no ha estado en contacto con la superficie, ésta no sufre de procesos colmatantes y cumple las siguientes circunstancias:

- Apenas presenta concentraciones de oxígeno disuelto.
- Su conducción se realiza en circuito cerrado por lo que se limita la actividad biológica y la producción de óxidos de hierro.
- Prácticamente están ausentes los sólidos en suspensión.
- La composición química del agua subterránea en la zona de reinyección guarda similitud con la del agua que se inyecta.
- La composición química del agua subterránea es relativamente simple.

Figura 1-60. Sondeo de reinyección RI004.

Tras haber expuesto los dispositivos de los que consta el Sistema de Drenaje-Reinyección, se va analizar las consecuencias posibles generadas por este sistema de recarga artificial en el acuífero:

Efectos sobre la salinidad del acuífero

El proyecto no introduce ninguna sustancia salina ajena al acuífero, aunque el sistema de drenaje-reinyección incide sobre la distribución actual de la salinidad.
Se ha tomado el ión cloruro para ilustrar el efecto que se produciría sobre la salinidad del acuífero al ser muy soluble y tener una concentración de partida alta respecto al resto. Se asume en la modelización que los cloruros no se reduzcan en ninguna reacción química que pudiera tener en el acuífero.

En general, la concentración de cloruros aumenta con la profundidad del acuífero, aunque esta distribución ha sido alterada presumiblemente por el régimen de flujo del acuífero, ya que históricamente el flujo natural se dirigía hacia el principal punto de descarga (Rivera del Huelva), ahora reforzado por la llamada de aguas que provocan los bombeos agrícolas situados en la zona de Guillena-Matahijas, que ha aportado agua más salina de las zonas más profundas del acuífero, de manera que los sondeos de extracción más salinos se localizan al sur de Guillena.

Se han realizado simulaciones en periodos anuales y durante cada periodo anual, la calidad del agua reinyectada se ha ajustado a la calidad del agua extraída en los sondeos de drenaje.

Calidad del agua subterránea captada en los sondeos de drenaje

La calidad del agua captada en cada uno de los sondeos de drenaje repercute en la calidad de las aguas subterráneas en la zona de reinyección, puesto que presentará variaciones debido principalmente a:

- Durante la vida de la operación minera, las direcciones de flujo cambian por

descenso piezométrico en el área de la mina.
- Durante la vida de la operación minera, la corta va siendo ampliada y algunos de los sondeos de drenaje se desplazan hacia el este.
- Se produce una retroalimentación retardada, debida a la llegada a los sondeos de drenaje de la pluma de reinyección, con diferente concentración de sales.

La mayor parte del agua, dentro del área limitada por los sondeos de reinyección, presenta una concentración en cloruros de 100 a 500 mg/l, que tenderá a desplazarse con el flujo regional hacia la zona de Matahijas-Guillena.

Durante la clausura de la explotación minera se espera que la cantidad de agua drenada y reinyectada disminuya año a año, ya que el sistema de recirculación cesará cuando se desconecte el sistema de bombeo. De esa forma, se permitirá que el nivel piezométrico y las direcciones de flujo vuelvan a la situación original previa a la explotación. La única diferencia será que al reducirse un volumen de acuífero por el hueco de la corta el cual se sustituirá por margas, el flujo rodeará ese material de baja permeabilidad.

Efectos sobre la concentración de metales en el acuífero

Durante la explotación de la mina se producirá la oxidación de los materiales piríticos presentes en la corta y expuestos al aire e incluso por las burbujas entrampadas en el acuífero. Estos materiales oxidados, entrarán en contacto con el agua de inundación de la corta, con lo que los oxi-hidróxidos producidos pueden ser disueltos, pudiendo pasar al acuífero.

Para calcular la cantidad de material del acuífero que puede ser oxidado en la corta, se ha partido de los resultados obtenidos en los ensayos realizados en celdas húmedas, sobre muestras obtenidas de rocas del yacimiento mineral Las Cruces. Los componentes solubles disponibles, se han obtenido a partir de la media de una muestra típica de roca volcánica y otra de pizarra.

Los cálculos realizados se han basado en las siguientes hipótesis:

- El índice de oxidación de la roca es proporcional al área superficial disponible (incluyendo la superficie fracturada).
- Las fracturas se producen en la roca en tres direcciones, a intervalos de 1 m en cada dirección, penetrando la oxidación entre 50 y 100 m en los taludes de la corta en el Paleozoico.
- La lixiviación de estos materiales sigue el ritmo obtenido a partir de los test realizados.
- La oxidación se producirá en todos los taludes durante 15 años.
- Todo el material soluble se acumula y penetra con el agua que inunda la zona oxidada, a medida que se recupera el nivel de agua.
- Ningún material disuelto se redeposita de nuevo o es absorbido por la roca.
- El proceso de oxidación incrementa la permeabilidad de los materiales de baja permeabilidad y la porosidad del material oxidado se supone del 5%.

El resultado de este cálculo, da una concentración inicial de cobre de 14, 9 mg/l. Se ha

seleccionado el cobre para mostrar los efectos de la migración de metales por que alcanza altas concentraciones en las rocas de los taludes de la corta, y por tratarse de un elemento relativamente móvil.

En estas condiciones y para evitar que esta agua afecte negativamente a la calidad del agua del acuífero, durante el periodo de clausura (duración prevista de 8 años), se bombeará agua desde 15 sondeos situados en la zona oxidada. Esta agua será tratada y reinyectada. A lo largo de ocho años, se permitirá que el conoide de drenaje, originado por el dispositivo de drenaje de la corta se recupere lentamente.

Figura 1-61. Sondeo de extracción conectado con el circuito.

Al final del octavo año de clausura seguirá funcionando un bombeo reducido, para mantener los niveles de agua por debajo del fondo de la corta durante las operaciones de relleno de la misma con residuos inertes. El bombeo dejará definitivamente de funcionar en el año 34 desde el comienzo de la explotación. Durante este periodo, el nivel piezométrico y las líneas de flujo del agua subterránea iniciarán su recuperación hacia la situación previa a la explotación minera con la excepción del hueco de corta acuífero que se rellenará con margas.

Todos estos productos generados por la oxidación se comenzarán a desplazar con el tiempo con el flujo del agua subterránea, una vez que los niveles piezométricos recuperen su posición original, sin embargo tanto la cantidad de material residual existente como la velocidad del movimiento de flujo, son muy pequeñas. Por otra parte, se producirán reacciones y procesos de adsorción, en relación con el flujo del agua, que fijarán y retendrán parte de los iones metálicos en migración, disminuyendo paulatinamente la cantidad en solución, así como de precipitación al pasar a formas insolubles debidas al cambio de pH.

Estos resultados de migración, a pesar de haber asumido las hipótesis más desfavorables, están a concentraciones de niveles traza.

Como se puede ver, este dispositivo de recarga artificial es uno de los más complejos e importantes que se han desarrollado actualmente en España y cuyo buen funcionamiento es de gran trascendencia para el medio ambiente y para los propios usuarios de las aguas subterráneas del acuífero Nieblas-Posadas.

LA INSTALACIÓN PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL DE "LOS SOTILLOS" (CÁDIZ)

Este proyecto comenzó como consecuencia de la sequía sufrida entre los años 1992-1995, que provocó el aumento del consumo del agua procedente del acuífero.
Como medida paliativa se propuso utilizar los excedentes invernales para que regularan la situación del acuífero. La instalación piloto se diseño a partir de los datos obtenidos por la comunidad de regantes de Los Sotillos desde los años 70 para posteriormente construirse una obra más importante.

La planta piloto está situada Unidad Hidrogeológica 05.55, "Aluvial del Guadalete", situada en la zona media–alta de la Cuenca del Guadalete y que contiene dos acuíferos, los llamados "Los Llanos de Sotillo" y "Aluvial de Guadalete", pero es el primero de ellos donde se está realizando la recarga artificial.

Este acuífero tiene una litología que consiste en arenas, cantos y arcillas del Plioceno (Litorales), Pliocuaternario y Cuaternario (Fluviales) mientras que la litología impermeable son margocalizas y margas del Triásico, Cretácico y Mioceno.

Los límites del acuífero son el río Guadalete al NO, el río Majaceite al NE, el arroyo Salado al O y el substrato impermeable Triásico al SE y SO.

Según estos límites, se obtiene un área permeable de 52 km^2 con unos espesores muy variables que alcanzan los 80 m en la zona central del acuífero, y espesores saturados de 10 a 50 m (CHG, 1994).

Los parámetros hidrogeológicos que se han determinado para el acuífero son:
T= 10^{-3} m^2/s (90 m^2/d); S = 2 – 5%; Gradiente hidráulico medio <1% (ITGE – J.A., 1998).

Los usos principales del agua extraída son la agricultura y ganadería aunque se dio una importante explotación para abastecer la bahía de Cádiz durante la sequía ya mencionada.

Por medio de balances hídricos se ha sabido que el acuífero sufre de un cierto grado de sobreexplotación (ITGE, 1995) ya que se ha obtenido 39 hm^3/a de salidas frente a 24 hm^3/a de entrada.

Para poder realizar la recarga artificial en la zona se dispone de los meses comprendidos entre Diciembre y Junio.

Al comenzar la obra de la planta piloto se modificó el dispositivo de infiltración (planta de infiltración constituida por una balsa de decantación y una zanja de infiltración) debido a que el acuífero se encuentra por debajo de unos 10 m de arcilla.

Se optó por pozos de infiltración de 25 m de profundidad con un sistema de tuberías para la limpieza del filtro por bombeo, una balsa de decantación y un canal filtrante con relleno de grava que transportaría el agua hasta los cuatro pozos.

La planta piloto que se ha construido consiste en dos pozos de infiltración, de 2 m de diámetro y profundidad de 20 m, rellenos de cantos rodados y grava (uno de naturaleza silícea y otro carbonatada), con un filtro de arena silícea (entre 1 y 7 mm de tamaño) con un espesor de 0,5 m.

Los pozos presentan en sus 10 primeros metros anillos de hormigón de 1 m cada uno y están en contacto directo con el acuífero a lo largo de la zona no saturada en los 10 metros restantes.

Entre el arroyo “La Molineta” y los pozos, se construyó una balsa de decantación de paredes de hormigón y, en su interior, unos muretes de ladrillo con el fin de reducir la velocidad del agua y los sólidos en suspensión.

La entrada de agua en la balsa se produce por un canal dotado de una compuerta de regulación. El agua alcanza la base de este canal gracias a un azud construido en el cauce del arroyo.

Entre la balsa y los pozos se instaló un canal con el fin de conocer el caudal de entrada. La instalación se completa con un sistema de desagüe que desemboca aguas abajo del azud.

Durante el tiempo de ensayo (17 a 19 de Abril de 2001, durante 52 horas) se introdujeron aproximadamente 1.500 m^3 de agua con un caudal medio de 7,8 l/s. Se registró también el nivel del agua en los propios pozos de recarga mediante tubos piezométricos.

De este análisis se han obtenido varias interpretaciones:

- La lámina de agua tiende a estabilizarse a una altura próxima a 4 m en las últimas horas.
- Respecto a la recuperación, se observó una tendencia exponencial, es decir, el caudal de infiltración es mayor cuanta más alta sea la lámina de agua. Sin embargo se considera que esta variación no es muy relevante dado la mínima variación de la altura de la lámina de agua (0 a 4 m)
- La capacidad de decantación de la balsa se estima a partir del caudal que se pone en circulación (7,8 l/s de media), el volumen de la balsa (aprox. 1.047 m^3), el tiempo de llenado de la balsa (37 h) y cantidad de sólidos en suspensión antes de que el agua entre en la balsa (19,75 mg/l) y después (6 mg/l), se observa una reducción de esta carga de un 65-70%.
- La tasa de infiltración media de recarga artificial ha sido de 213 m/día para un caudal de 7.8 l/s y un área de infiltración de 3,15 m^2.
- El filtro está compuesto por arena silícea de diámetro 1 a 6 mm. Los valores de la permeabilidad de este filtro están entre 90 y 8 m/día, más próximos a este último valor que al primero.
- El domo de recarga produce sobre la superficie piezométrica de los alrededores del pozo ascensos de 5 m en un radio de 12 m y de 1 m en un radio de 25 m.
- El agua que discurre por el Arroyo "La Molineta" es del tipo Bicarbonatada-Cálcica, con alto contenido en sodio y potasio (sobre todo del primero).
- Se observó que, tras la experiencia de recarga artificial, se generó una fina película

de 0,5 mm de espesor de material tamaño limo-arcilla sobre la superficie del filtro, cuyo origen es el material en suspensión que transporta el agua tras pasar por la balsa de decantación.

Como conclusiones, tras esta experiencia piloto, se obtiene que las características del acuífero son favorables para esta técnica por lo que se pretende realizar un estudio hidrogeológico con mayor intensidad para mejorar los resultados obtenidos, aunque para futuras recargas artificiales se debería estudiar técnicas que disminuyan procesos de colmatación.

RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO DE EL SEÑORÍO, MARBELLA

Desde el año 2000 AQUAGEST SUR S.A. emplea la recarga artificial de acuíferos para aumentar las reservas y combatir la intrusión marina.

El acuífero en cuestión donde se están realizando estos procedimientos es el de El Señorío, localizado en Marbella, Málaga.

Este acuífero tiene una extensión de 7,1 km² y presenta espesores de 150 m. Es un acuífero libre en su parte septentrional pero está confinado en el resto de su extensión. Como la mayoría de los acuíferos de la unidad hidrogeológica de Marbella-Estepona, El Señorío está formado por conglomerados, arenas y limos arenosos del Plioceno. En cuanto a sus parámetros hidrogeológicos, tiene transmisividades de 1.990 m²/día, un coeficiente de almacenamiento que suele estar entre 5,7 10^{-3} y unos recursos estimados de 1,13 hm³/año.

La presente actuación de recarga artificial consiste en aprovechar los excedentes invernales procedentes del manantial de Camoján, aliviadero de Sierra Blanca (acuífero formado por mármoles triásicos que sufren karstificación), aunque sólo es efectivo durante los periodos de grandes crecidas, por que el manantial de Camoján depende mucho de la influencia de pluviométrica.

Hay que mencionar que la recarga artificial sólo se activa 2 ó 3 días después de grandes lluvias para reducir los procesos de colmatación.

Los dispositivos consisten en una tubería que capta el agua del manantial ya mencionado, y la distribuyen por efecto de la gravedad a unos sondeos, construidos en 1995, en donde es inyectada al acuífero mediante un sistema de válvulas.

En estos sondeos se han mantenido las bombas que tenían para facilitar la limpieza de los mismos. Al final, los máximos caudales de inyección que AQUAGEST ha obtenido han sido cercanos a los 80 l/s.

Desde el año 2000 los datos obtenidos de la recarga artificial han sido muy favorables. Se ha conseguido un caudal medio inyectado de 0,17 a 0,25 hm^3/año cuyo valor es un 10 % de los recursos del acuífero del Señorío, mientras que el coste de las labores de mantenimiento son 0,03 €/m^3.

Figura 1-62. Toma de agua del arroyo Camoján. Tomado de Sánchez y Castillo, 2005.

Posteriormente, AQUAGEST SUR junto a SEDELAM y AGBAR decidieron variar el dispositivo de recarga con el fin de aumentar los caudales de inyección en el acuífero.

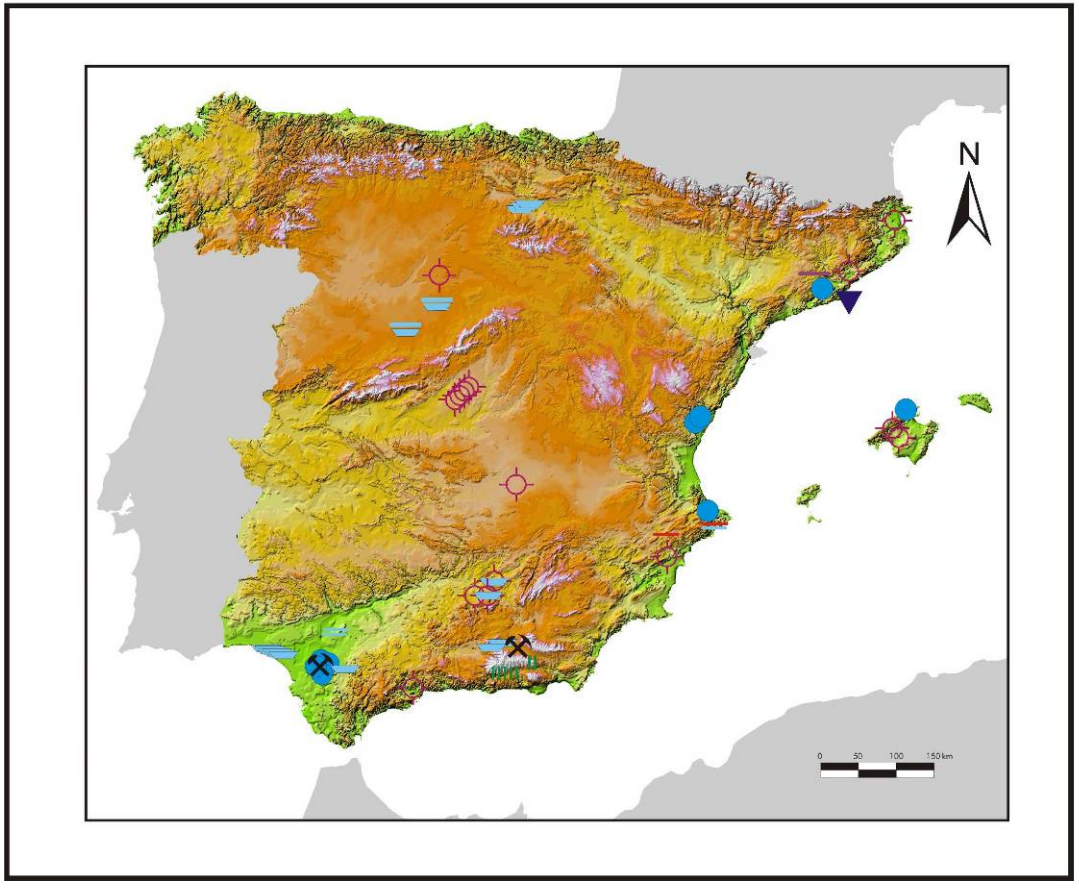
Este proyecto se realizó entre los años 2005-2006, y consistió en la construcción de un sondeo adecuado a la inyección de agua por presurización que incluía los procesos de mantenimiento y limpieza mediante aire comprimido, al menor coste posible.

CONCLUSIONES

A pesar de que se ha intentado buscar, analizar y obtener todos los antecedentes y experiencias en recarga artificial realizados en España, este inventario está abierto a cualquier aportación que pueda aumentar y enriquecer este recopilatorio de actuaciones de recarga artificial.

Figura 1-63. Posición de los principales dispositivos de gestión de la recarga en España, bien sean previos, dispositivos operativos o proyectos a corto plazo (página siguiente).

DISPOSITIVOS OPERATIVOS EN ESPAÑA



BIBLIOGRAFÍA

- AGBAR (2005). "Informe de actividades de I+D+i del Grupo, 2005".
- Álvarez, J.A, Sauquillo Herraiz, A, Solera Solera, A, Pulido Velázquez, M, y Paredes Arquiola, J. (2010). "Uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas". Ponencia para el XII Congreso Nacional de Comunidades de Regantes de España, organizado por FENACORE
- Andreo Navarro, B. "Investigación para la protección y la gestión de los recursos hídricos de acuerdo con la directiva marco del agua (aguas subterráneas, ejemplos de la provincia de Málaga)".
- Andreu, J.M, Delgado, J, García-Sánchez, E, Pulido-Bosch, A, Bellot, J, Chirino, E. y Ortiz de Usbina, J.M. "Caracterización del funcionamiento y la recarga del acuífero del Ventós-Castellar (Alicante)". Rev. Soc. Geol. España, 14(3-4): 247-254.
- Armayor Cachero, J.L, Murillo Díaz, J.M., Rodríguez Hernández, I. "Recarga artificial mediante construcción sobre el cauce del río Girona de pequeños diques y represas acuífero de Orba (Alicante)".
- Ballesteros Navarro B.J, López Gutiérrez, J, Grima Olmedo J, García Menéndez, O. y Pérez Gago, M. "Recuperación de la calidad del acuífero costero de la plana de Javea mediante la explotación sostenible de sus recursos".
- Codina Roig, J. (2009). "La protección y recuperación de las masas de aguas subterráneas. Visión de los usuarios".
- Cortés, T. (2001). "El plan hidrológico nacional y la gestión sostenible del agua. Aspectos medioambientales, reutilización y desalación". Plan de reutilización en la comarca de Campo Dalias (Almería).
- Custodio, E. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. (2007). "Las aguas subterráneas en el territorio español. Acuíferos detríticos costeros del litoral mediterráneo peninsular: Valle Bajo y delta del Llobregat".
- De la Orden, J.A, López-Geta, J.A, y Murillo, J.M. (2003). "Experiencias de recarga artificial de acuíferos realizadas por el IGME en acuíferos detríticos". Boletín Geológico y Minero, 114.
- De la Orden, J.A, Medina, F, Navarro, J.A, Rubio, J.C. y Murillo, J.M. "Actualización hidrogeológica de la unidad Guadix-Marquesado como apoyo a la modelación matemática del acuífero".
- De la Orden, J.A, Murillo, J.M, Sesmero, C y Blasco, O. (2009) "Posibilidades de recarga artificial del acuífero de Crestatx (Mallorca) con excedentes de las Ufanes de Gabellí". Boletín Geológico y Minero, 120.
- De la Orden, J.A, López-Geta, J.A y Murillo, J.M. (2003). "Experiencias de recarga artificial de acuíferos realizadas por el IGME en acuíferos detríticos". Boletín Geológico y Minero, 114.
- El Mundo / El día de Baleares. (Lunes 22 de marzo de 2010). **"**Récord histórico en los acuíferos".
- García Poveda, L. "Recarga artificial de acuíferos con excedentes invernales del río Belcaire (Castellón)" Jornadas internacionales sobre: La gestión de la recarga artificial de acuíferos.
- Gollonet Fernández de Trespalacios, J. (2003). "Experiencia en la selección, instalación y mantenimiento de equipos de medida". Operatividad de la instrumentación en aguas subterráneas, suelos contaminados y riesgos geológicos.

- González Ramón, A, Gollonet Fernández de Trespalacios, J, Rubio Campos, J.C, Luque Espinar, J.A, Hidalgo Cano, M y Hidalgo Cano, J.L. (2002). "Posibilidades de mejora del abastecimiento de Alcalá la Real mediante inyección de aguas en el acuífero de los Llanos. Presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén".
- González Ramón, A. (2007). "Hidrogeología de los acuíferos kársticas de las sierras de Pegalajar y Mojón Blanco (Jaén)".
- González ramón, A, Rubio Campos, J.C, López-Geta, J.A, Ortuño Alcaraz, I, Martos Rosillo, S, Santiago Martín, A, Peinado Parra, T y Ortuño Morales, A. (2002). **"**Los acuíferos de la cabecera del río víboras, potencial hídrico garante del abastecimiento a la comarca de Martos y al sistema Quiebrajano". Presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén. IGME.
- González Ramón, A. (2009). "La recarga artificial como apoyo al abastecimiento de poblaciones. Experiencias en la provincia de Jaén". Boletín Geológico y Minero, 120.
- IBERINSA. **"**Informe de viabilidad del proyecto de recarga de la unidad hidrogeológica Campo de Cariñena".
- IGME. (Diciembre 2007). Actuaciones de uso conjunto y recarga artificial encaminadas a mejorar la gestión medioambiental y el uso sostenible de los acuíferos ligados a la arteria transversal de la isla de Mallorca. "Evaluación del balance hídrico y determinación de la recarga natural del acuífero de Crestatx, Mallorca".
- IGME. (1988). "Las aguas subterráneas y los acuíferos del Campo de Dalías (Almería)".
- "Informe de viabilidad proyecto de presa de Mularroya, azud de derivación y conducción de trasvase. (Zg/La Almunia de doña Godina y otros)".
- Informe de viabilidad de la actuación 3.1.f. Obras de regulación para recarga de los excedentes invernales del río Belcaire (Castellón).
- Kupper, E, Pérez Paricio, A y Hunnink, J. (2009). "Primer Plan Director de Usos de un acuífero aluvial en Cataluña".
- López-Camacho, B y Iglesias Martín, J.A. "Gestión de los recursos hídricos en el sistema de abastecimiento de la Comunidad de Madrid" Canal de Isabel II.
- López Geta, J.A, Moreno Merino, L, Murillo Díaz, J.M, Rubio Campos, J.C. y Gómez López, J.A. "Nuevas estrategias para la depuración y reutilización de las aguas residuales urbanas. Empleo del terreno como almacén y depurador natural".
- López Geta, J.A. "Consideración de estos recursos en los Planes Hidrológicos**".**
- Martínez Parra, M y Murillo Díaz, J.M. "Evolución de la contaminación marina en los acuíferos costeros del Baix Tordera (Barcelona)".
- Mateos Ruiz, R.M, Crespê Bestard, D, Galmés Díaz Plaja, A y González Casasnovas, C. "Regadío con aguas residuales tratadas en la isla de Mallorca. Afección a las aguas subterráneas".
- Moreno Merino, L, Gómez López, J.A, Murillo Díaz, J.M y Rubio Campos, J.C. "Depuración de aguas residuales urbanas mediante infiltración directa sobre el terreno. El modelo experimental de Dehesas de Guadix, (Granada)".
- Murillo, J.M, De la Orden, J.A. y Gavilán, C.J. (2009). "Análisis de las disponibilidades hídricas de los torrentes de Son Real y Binicaubell (Mallorca-España) para su utilización en la recarga artificial del acuífero de la Marineta". Boletín Geológico y Minero, 120.

- Murillo, J.M, Orden Gómez, J.A, Armayor Cachero, J.L, Castaño Castaño, S. (2000). "Recarga artificial de acuíferos. Síntesis metodológica. Estudios y actuaciones realizadas en la provincia de Alicante. Septiembre 1999".
- Murillo, J.M, Rubio campos, J.C, Martín Machuca, C y López-Geta, J.A. (2002). "Las experiencias de recarga artificial de acuíferos realizadas por el IGME en colaboración con otros organismos en Andalucía" Aportaciones al conocimiento de los acuíferos andaluces. Libro homenaje a Manuel del Valle Cardenete.
- Murillo, J.M, De la Orden, J.A. y Gavilán, C.J. (2009). "Análisis de las disponibilidades hídricas de los torrentes de Son Real y Binicaubell (Mallorca-España) para su utilización en la recarga artificial del acuífero de la Marineta". Boletín Geológico y Minero, 120.
- Murillo, J.M, De la Orden Gómez, J.A. y Rodríguez Hernández, L. "La recarga artificial como técnica de recuperación de acuíferos contaminados. Aplicación a la plana de vergel (Alicante**)".**
- Ortuño, F, Niñerola Pla, J.M, Armenter ferrando, J.L y Molinero Huguet, J. (2009) "La barrera hidráulica contra la intrusión marina y la recarga artificial en el acuífero del Llobregat (Barcelona, España)".
- Porras Martín, J, Ballester Rodríguez, A, Pozo Granado, J, Ballenilla Viciana, A, Malvárez Cid, J, Porras Cabañero, M, Alonso Martín-Romo, A, Monterde Ruiz, J. (IGME, 1984). "Recarga de acuíferos profundos en el valle del Esgueva (Valladolid - Palencia)".
- Queralt, E. (2009) "La gestión de la recarga en la cuenca del río Llobregat desde el punto de vista de los usuarios" Jornadas Internacionales sobre: La gestión de la recarga artificial de acuíferos.
- Ramón Llamas, M."El fiasco del acuífero de Madrid La Directiva Marco del Agua, remedio de hidroesquizofrenia".
- Rubio Campos, J.C, Lupiani Moreno, E, Delgado Moya, S, López Geta, J.A, Iglesias López, A, Perandres Estarli, G, Castillo Pérez, E y Delgado García. J. (2002). "Experiencia de recarga artificial mediante la utilización de las aguas de drenaje de la mina de Alquife en el acuífero de Guadix (Granada)".Aportaciones al conocimiento de los acuíferos andaluces. Libro homenaje a Manuel del Valle Cardenete.
- Sala, L. "La experiencia práctica en reutilización del agua: el caso de la Costa Brava."
- Sala, L. (2009) "Gestión del agua regenerada y criterios de recuperación de costes".
- Sánchez Díaz, L y Castillo Martín, A. "Itinerario hidrogeológico por el litoral mediterráneo andaluz". Universidad de Granada. Instituto del Agua. Agencia andaluza del Agua. Conserjería de Medio Ambiente.
- http://iagua.es/2010/06/la-confederacion-hidrografica-del-ebro-adjudica-una-actuacion-para-mejorar-la-recarga-de-los-acuiferos-del-campo-de carinena/?utm_source=feedburner&utm_medium=email&utm_campaign=Feed%3A +DirectivaMarcoDelAgua+%28iAgua.es%29
- http://www.aiguesdebarcelona.es/esp/index.asp
- http://www.cuacsa.org/index.php
- http://aca-web.gencat.cat/aca/appmanager/aca/aca/
- http://aguas.igme.es/igme/homec.htm
- http://www.agbar.es/esp/home.asp
- http://www.aquagest-levante.es/ESP/home.asp

INVENTARIO DE TIPOLOGÍAS DE DISPOSITIVOS DE GESTIÓN DE LA RECARGA A NIVEL INTERNACIONAL. APORTACIONES AL ESTADO DEL ARTE Y NUEVAS PROPUESTAS. Por Enrique Fernández Escalante, Mª Jesús Minaya Ovejero y Miriam W. Senent del Álamo.

Este apartado fue iniciado en la "fase de definición", en los orígenes del proyecto, y ha tenido un seguimiento permanente del estado del arte a través de alertas de Internet y foros específicos.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el crecimiento progresivo de la población está generando un aumento de la demanda de agua, que, junto a los problemas de contaminación y sobreexplotación de los acuíferos, plantean un futuro poco alentador al que sumar las consecuencias del cambio climático.

Todo esto sucede en un momento, en que los sistemas de almacenamiento más tradicionales son en muchas ocasiones insuficientes para lograr abastecer a toda la población mundial, frente a los sistemas de recarga artificial, o mejor, gestión de la recarga, que empiezan a plantearse como una posible alternativa a algunos de estos problemas.

La recarga artificial de acuíferos no sólo es un sistema de almacenamiento de agua, sino también un método de lucha contra la intrusión marina, un sistema de recuperación y regeneración de humedales, un método de control de la erosión y la desertización, además de un método efectivo de depuración de las aguas.

Aunque las técnicas de recarga artificial parezcan en muchos casos una nueva tecnología, algunas de ellas, existen desde hace varios siglos. Los primeros qanats por ejemplo, fueron construidos por los persas en oriente medio en torno al año mil antes de Cristo, y muchos de ellos todavía siguen en funcionamiento. Hay amunas precolombinas en Perú, careos y boqueras de origen árabe en el sur y este español, etc. Sin embargo, existen otros sistemas de recarga artificial que precisan de las últimas tecnologías, como pueden ser los sondeos de inyección y recuperación (ASR), o nuevas tecnologías de riego subterráneo.

El proyecto DINA-MAR, es un proyecto de I+D+i desarrollado por el grupo TRAGSA. El objetivo de este proyecto es identificar que zonas de España (zonas MAR) son favorables para la aplicación de técnicas de recarga artificial de acuíferos. Dentro de este proyecto se incluye el seguimiento y control de un sistema de recarga artificial mediante balsas y canales, que se está llevando a cabo en la Cubeta de Santiuste (Segovia).

Dentro del ámbito del proyecto DINA-MAR se han estudiado los antecedentes relacionados con tipologías de dispositivos de gestión de la recarga y realizado nuevos estudios y aplicaciones de técnicas para mejorar los dispositivos existentes y proponer otros nuevos, mejorando la calidad de las aguas, minimizando los problemas de colmatación, etc.

OBJETIVOS

El objetivo de este apartado es realizar una descripción general de las estrategias que actualmente más se utilizan en la gestión de recarga artificial de acuíferos.

Este documento no es sólo una mera recopilación de información obtenida de diversas fuentes, sino que aporta nuevas posibilidades técnicas.

La elaboración de este informe, se debe al compromiso del proyecto DINA-MAR de establecer y divulgar todas las posibilidades que ofrecen estas nuevas herramientas de gestión del agua, así como conseguir una idea global de los sistemas, sus componentes, sus posibles aplicaciones y usos.

MATERIALES Y METODOS

El punto de partida ha sido una de las clasificaciones más completas de dispositivos MAR existentes hasta la fecha, la clasificación de Gale (en Gale, 2005). Ésta clasificación establece cinco grandes grupos dentro de los cuales se distribuyen los diversos sistemas de recarga artificial (de aquí en adelante AR, o mejor, MAR). Sobre ésta clasificación se proponen nuevas técnicas, una reclasificación y se desarrollan algunos aspectos constructivos basados en la experiencia adquirida por DINA-MAR en sus “zonas piloto”, dotadas, principalmente, de canales, balsas y pozos de recarga, sistemas de riego, diques y Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS).

Las zonas piloto reseñadas, donde se han realizado ensayos para complementar las experiencias obtenidas de la bibliografía, han sido la Cubeta de Santiuste y la comarca del Carracillo, en Segovia; y los pozos de recarga del canal del Guadiana, en Ciudad Real. Las primeras obras fueron construidas por el antiguo ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación o MAPA (actual MARM), para solucionar los acusados descensos en los niveles freáticos, producidos por la intensa extracción de agua para regadío. Después de ocho años de acción, se ha conseguido solventar el problema y hasta la fecha los resultados son bastante satisfactorios. En el caso de los pozos, son una iniciativa de la confederación hidrográfica del Guadiana, que han permitido el estudio de ciertos procesos.

Dentro del ámbito del proyecto DINA-MAR, también se han elaborados diversos iconos y esquemas de los dispositivos que constituyen la nueva clasificación; y recopilado una serie de fotografías, mapas y artículos, además de la creación de una página Web sobre el proyecto. Gran parte de esta nueva información ha sido incorporada en este texto.

DESCRIPCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS

Existen gran número de posibles variaciones en los dispositivos de recarga artificial ya existentes, dado que, en todos los casos, cada uno debe adaptarse a las condiciones y características de la zona donde se vaya a ubicar, en aras de lograr el máximo rendimiento y efectividad.

Un requisito previo en la gestión de la recarga artificial de acuíferos es la disponibilidad de una fuente de agua próxima, con un volumen suficiente y con la calidad necesaria. Los sistemas de gestión de la recarga o *managed aquifer recharge*, o simplemente, "sistemas MAR", pueden utilizar aguas con diferentes orígenes y calidades, siendo éste un aspecto muy importante a tener en cuenta, tanto en el diseño como en la selección de los materiales a emplear.

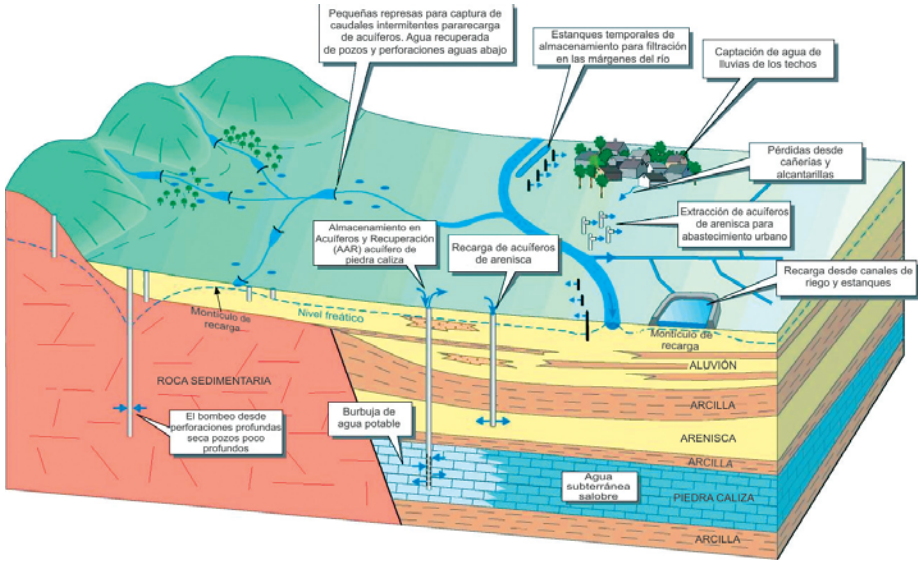


Figura 2-01. Alguno de los diversos dispositivos de AR que pueden emplearse en la gestión de los recursos hídricos de una cuenca. Figura tomada de UNESCO IHP.

Una de las técnicas MAR más extendidas en la actualidad es la reutilización de excedentes hídricos de depuradora o de desaladora, o la recuperación de aguas residuales para usos no potables, que se han sumado en los últimos años al empleo más tradicional del agua potable para la recarga artificial de acuíferos.

A continuación se enumeran y describen las distintas tipologías y dispositivos, incluyendo los contemplados en la clasificación de Gale de 2005, si bien, algunos de ellos son descritos conforme a referencias bibliográficas, por haber quedado fuera del alcance de este trabajo.

MÉTODOS DE DISTRIBUCIÓN
- Cuencas y estanques de infiltración
- Tratamiento Suelo-Acuífero (SAT)
- Inundación controlada
- Recarga incidental por riego

MODIFICACIONES EN EL INTERIOR DEL CANAL
- Estanques de percolación asociados a represas de control, gaviones, etc.
- Represas de arena para almacenamiento
- Represas subsuperficiales
- Represas con perdidas

RECARGA CON POZOS, TÚNELES Y PERFORACIONES
- Pozos abiertos y túneles
- Almacenamiento en Acuíferos y Recuperación (AAR)

INFILTRACIÓN INDUCIDA EN LAS MÁRGENES DE LOS RÍOS
- Filtración en las márgenes de los ríos
- Filtración inter-dunar

CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA
- Construcción de terraplenes, etc.
- Recolección de agua de lluvia en techos

A la clasificación de Gale, 2005, formada por 15 dispositivos de recarga artificial en total, se han propuesto nueve más, generando un total de 24 infraestructuras de AR que se distribuyen en 6 grupos (tabla 4-1). Esta se ajusta a una primera división de uso generalizado, que diferencia seis grandes grupos:

1. Sistemas superficiales de dispersión (canales y filtración).
2. Modificación del canal.
3. Sistemas profundos (Pozos, sondeos…).
4. Sistemas de filtración inducida en los ríos (RBF, filtración interdunar).
5. sistemas de captación de Agua de lluvia (SUDS y lluvia).
6. Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles (SUDS)

Nº	SISTEMA	TIPO DE DISPOSITIVO
1	DISPERSIÓN	BALSAS DE INFILTRACIÓN
2		CANALES DE INFILTRACIÓN
3		TÉCNICAS DE TRATAMIENTO SUELO/ACUÍFERO
4		CAMPOS DE INFILTRACIÓN (INUNDACIÓN Y DIFUSIÓN CONTROLADA)
5		RECARGA ACCIDENTAL POR RETORNOS DE RIEGO
6	MODIFICACIÓN DEL CANAL	DIQUES DE RETENCIÓN Y REPRESAS
7		DIQUES PERMEABLES
8		SERPENTEOS
9		ESCARIFICACIÓN LECHO
10		DIQUES SUBSUPERFICIALES/SUBTERRÁNEOS
11		DIQUES PERFORADOS
12	POZOS	QANATS (GALERÍAS SUBTERRÁNEAS)
13		POZOS ABIERTOS DE INFILTRACIÓN
14		POZOS PROFUNDOS Y MINISONDEOS
15		SONDEOS
16		DOLINAS, COLAPSOS…
17		ASR
18		ASTR
19	FILTRACIÓN	BANCOS FILTRANTES EN LECHOS DE RÍOS (RBF)
20		FILTRACIÓN INTERDUNAR
21		RIEGO SUBTERRÁNEO
22	LLUVIA	CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA EN IMPRODUCTIVO
23	SUDS	RECARGA ACCIDENTAL CONDUCCIONES Y ALCANTARILLADO
24		SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE

Tabla 2-01. Clasificación de los diversos tipos de dispositivos de recarga artificial, realizada para el proyecto DINA-MAR. Aparecen destacados los nuevos dispositivos de AR que aporta el proyecto a la clasificación de Ian Gale de 2005.

De acuerdo con Brown, 2005, una vez determinada una zona susceptible de llevar a cabo operaciones de gestión de la recarga, se debe seleccionar el tipo de dispositivo (o la combinación) más idóneo. El rendimiento de cada uno depende de la correcta elección y del diseño para cada caso, puesto que la eficiencia en la recuperación varía tanto con el método de AR, con las propiedades hidrológicas e hidroquímicas del acuífero, así como con el método de recuperación.

La dispersión, el espesor saturado del acuífero, el gradiente hidráulico inicial, el volumen del agua de recarga artificial, el tiempo de almacenamiento, la densidad de las aguas nativas en relación con las aguas de recarga artificial, la calidad de las aguas subterráneas, el numero de ciclos de recarga artificial y recuperación, el tipo de roca así como la presencia de zonas de alta permeabilidad en el acuífero, son algunos de los factores a tener en cuenta a la hora de diseñar y planificar la instalación de uno de estos dispositivos. Otros factores de gran interés pueden ser la temperatura y la proporción de aire contenido en el agua de recarga artificial, que pueden resultar un inconveniente o una ventaja según el caso. Sin embargo, la función de la transmisividad, la anisotropía y la porosidad siguen sin ser concluyentes.

Mientras que los métodos de superficie, como son los sistemas de dispersión y las modificaciones en el canal, infiltran el agua de recarga a través de la zona no saturada hasta el acuífero; los sistemas de pozos llevan a cabo una inyección directa del agua de recarga artificial en profundidad. Estas variaciones implican grandes diferencias tanto en el diseño, como en los estándares de calidad que debe cumplir el agua a gestionar.

A continuación se realiza un estudio de cada uno de estos seis grupos, detallando las características principales de cada uno de los 24 dispositivos que forman la nueva clasificación.

DISPERSIÓN (1 a 5)

Los sistemas de dispersión consisten en la distribución de las aguas de recarga artificial sobre una superficie permeable, por la cual se infiltra el agua a través de la zona no saturada hasta el acuífero. Para ello precisa afloramientos permeables y la proximidad de una fuente de agua fiable (en cuanto a cantidad y calidad se refiere).

Estos dispositivos se emplean, en general, en acuíferos superficiales libres, ya que el agua llega hasta el acuífero a través de la superficie del terreno.

En general, los estándares de calidad del agua de recarga artificial requeridos para este tipo de sistemas de superficie son menores que para los profundos, ya que el filtrado natural que tiene lugar en la zona no saturada y en el acuífero mejoran la calidad del agua infiltrada en origen.

1- Balsas de infiltración

Uno de los dispositivos de uso más extendido son las balsas de infiltración. Éstas pueden presentar un gran número de ventajas y utilidades, no sólo para la recarga artificial de acuíferos, sino para otros usos muy diversos, como es el tratamiento y depuración de aguas residuales, combate a los incendios forestales, etc.

Las balsas de infiltración presentan variaciones de diseño importantes con respecto a los embalses o balsas superficiales en cuanto a su morfología, capacidad, materiales y mantenimiento. Todos ellos dependen en gran medida de la calidad de las aguas de gestión de la recarga, de las características hidrogeológicas de la zona donde se vaya a instalar y del rendimiento que se espere obtener del dispositivo.

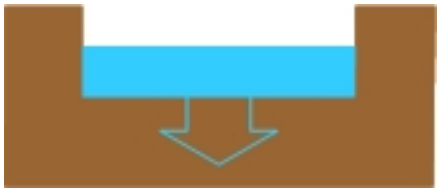


Figura 2-02. Icono que representa las balsas de infiltración, diseñado para el desarrollo de mapas temáticos que asocian dispositivos con tipo de acuífero de modo automatizado, en el ámbito del proyecto DINA-MAR

Existen unas exigencias comunes para los diversos tipos de balsas, como son el aprovechamiento del relieve natural y su ubicación actitudinal. A la excavación mecánica de las balsas cabe añadir el uso de minas abandonadas u otros elementos susceptibles de cumplir esta función sin realizar nuevas excavaciones.

Las balsas o estanques están constituidos por una depresión en el terreno (bien natural o artificial), con paredes inclinadas y cuyo fondo debe estar lo más nivelado posible, para favorecer que la infiltración sea homogénea.

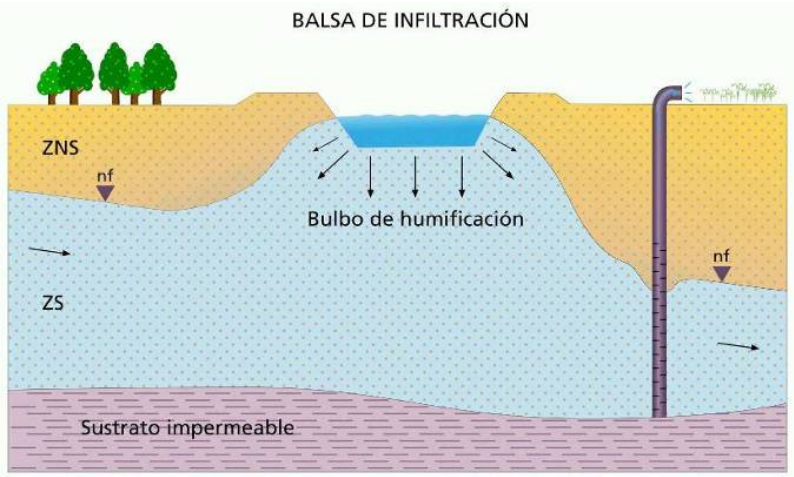


Figura 2-03. Esquema de un dispositivo tipo balsa.

Ya sea excavada en el terreno o rodeada de muros que retengan el agua de recarga, tanto el fondo de la balsa como las paredes deben tener una alta capacidad de infiltración. Si el acuífero esta formado por materiales menos permeables, deberá emplearse una capa de arena en el fondo y laterales de la balsa para retrasar los procesos de obstrucción y ampliar los periodos o ciclos de recarga artificial.

Las características hidrogeológicas más importantes que deben cumplir este tipo de dispositivos, es que el acuífero no sea confinado (superficial y libre), ya que la recarga artificial se produce desde la superficie, que posea un coeficiente de almacenamiento elevado y una alta transmisividad. Las formaciones aluviales, sistemas dunares o detríticos con buena selección suelen ser los más idóneos. Sin embargo, hay que considerar que unos valores excesivamente altos de transmisividad, pueden dar lugar a una rápida dispersión del agua de recarga artificial, lo cual dificultaría su recuperación. Es importante tener en cuenta que los materiales que afloran en superficie, deben tener una alta permeabilidad, para favorecer la infiltración del agua desde la superficie hasta el acuífero.

Otro factor determinante es el tiempo de residencia del agua en el acuífero. El retorno de las aguas a la fuente de toma con rapidez puede desestimar una actuación de este tipo, o bien encarecer los costes si fuera preciso intercalar diques, crear sondeos que intercepten las aguas a medida que retornan por su circuito natural o crear cualquier tipo de barrera hidráulica, bien positiva o negativa.

La ubicación de la balsa en una divisoria hidrogeológica es un factor favorable, al duplicar el destino de las aguas.

El control del nivel freático en la vertical es primordial, para evitar inundaciones u otro tipo de impactos si la recarga se gestiona de modo inadecuado y se sobrepasa la “profundidad de alerta” que debe ser definida para cada actuación. El monitoreo del acuífero y la rapidez de respuesta minimizan este impacto. En general, el control manual de la válvula de entrada está dando buenos resultados, transfiriendo a los

regantes este cometido y estando asesorados debidamente por un técnico especializado.

Para obtener unos volúmenes mínimos de recarga artificial de agua en el acuífero, es necesario que la superficie de infiltración de la balsa sea lo suficientemente extensa, lo que implica la ocupación de grandes superficies de terreno. Dicha necesidad de terreno o el elevado precio del suelo, puede ser uno de los factores más importantes a tener en cuenta a la hora de seleccionar y ubicar este tipo de dispositivos.

Otro de los inconvenientes que presentan los sistemas de recarga artificial mediante balsas, es que la infiltración debe realizarse de la forma más homogénea posible a lo largo de toda la superficie. Esto implica que los terrenos además de suficientemente extensos han de ser lo mas llanos posibles.

La fuente de agua que se utilice para recargar el acuífero también es importante, tanto desde el punto de vista de la calidad como de la fiabilidad de la misma. Debe estar lo más cerca posible de la zona donde vaya a instalarse la balsa y mantener un caudal mínimo durante el periodo de recarga artificial, lo cual abarata considerablemente los costes de la obra y el mantenimiento de las instalaciones.

La calidad del agua condiciona en gran medida el diseño, características y mantenimiento de las balsas. Si el agua proviene de una fuente potable, los problemas de colmatación, debidos a procesos mecánicos, químicos o a la actividad biológica, serán menores, que si se utilizan aguas residuales para la recarga del acuífero.

En general es conveniente construir un sistema de decantación previo, mediante balsas escalonadas, filtros intercalados en el sistema de alimentación, la compartimentación de una de las balsas o la construcción de plazoletas para favorecer la decantación de los sólidos en suspensión antes de llegar a la balsa, evitando, en la medida de lo posible, que aumenten los gases disueltos (la influencia del aire en el agua de recarga es un factor de suma importancia y se estudia en el capítulo 9).

Figuras 2-04 a) y b). a) Vista general de una balsa de infiltración situada en la Cubeta de Santiuste, provincia de Segovia; b) Detalle de la cabecera del dispositivo.

Los usos son muy diversos, tales como el riego de cultivos, consumo del ganado, reducción de la intrusión marina, regeneración de humedales, etc. Su uso para abastecimiento urbano es, en general, limitado.

Uno de los principales problemas que presentan estos dispositivos es la reducción en la capacidad de infiltración, debido a fenómenos de colmatación que tienen lugar en el fondo y paredes de la balsa, así como en determinadas profundidades del acuífero (por ejemplo en Santiuste se ha detectado un nivel más colmatado entre 50 y 60 cm de profundidad que en el espacio entre el *cake* superficial y el mismo (ver capítulo 7).

La construcción de caballones o el escarificado del fondo de la balsa favorecerá la recarga artificial, al aumentar la superficie de infiltración y facilitar la decantación de los finos en las partes más deprimidas. La distancia entre caballones es determinante en la tasa de infiltración. En los laboratorios experimentales se han detectado tasas máximas con distancias entre surcos cercanas a 80 cm (ver capítulos 7 y 8).

Debido al estancamiento del agua en la balsa, pueden producirse problemas de eutrofización en el fondo (producidos por la proliferación de bacterias), crecimiento masivo de plantas e incluso la aparición de enfermedades. El nivel eutrofizado se invierte además con la estación del año, a medida que la superficie se encuentra más fría o más caliente que el fondo. Un método para reducir estos problemas es el correcto diseño en cuanto a la profundidad de las balsas de infiltración se refiere. Por lo general un estanque de entre 1-4 m de profundidad, suele ser suficiente para prevenir un excesivo crecimiento de algas o plantas y seguir siendo lo suficientemente somero para que no se produzcan condiciones anaerobias en la parte inferior de la balsa.

La altura de la lámina de agua es otro factor muy influyente, pues un excesivo peso compacta el fondo y disminuye la tasa, y una lámina delgada no induce la presión necesaria para aumentar esta tasa de infiltración. Los valores más altos, en cuanto a tasa de infiltración se refieren, obtenidos en los laboratorios experimentales del proyecto y con cálculos hidráulicos (modelización), se han dado con alturas de la lámina de agua cercanas a 80 cm (cifra similar a la distancia óptima entre caballones). Con mayores espesores se compacta el fondo y con menores el agua no es “empujada” hacia el fondo con la fuerza justa.

Para reducir lo máximo posible la obstrucción producida por la decantación de finos y minimizar las perdidas por evaporación, es necesario realizar una serie de inspecciones periódicas y un mantenimiento adecuado para cada situación. Los métodos de mantenimiento de las balsas de infiltración son variables, desde la alternancia de ciclos de llenado-secado para reducir la actividad biológica en la balsa, el escarificado del lecho, la retirada de la capa superficial de suelo y su sustitución por terreno natural “limpio” en función del grado de colmatación, etc.

La utilización de métodos de recarga artificial combinados, como puede ser tratamientos mecánicos combinados con Técnicas de Tratamiento de Suelo y Acuífero (SAT), mejoran considerablemente la efectividad de estos dispositivos y reducen los costes de obra y mantenimiento (ver capítulo 7).

Figura 2-05. La presencia de pequeñas depresiones en la balsa favorece la acumulación de los materiales más finos en estas zonas. Santiuste de San Juan Bautista, Segovia.

A tenor de lo expuesto, este tipo de dispositivos requieren estudios hidrogeológicos de detalle previos a su implantación.

Figura 2-06. Balsas de infiltración en la ciudad de Atlantis, para reducir la intrusión marina y mantener la calidad de las aguas subterráneas. Fotos por cortesía de G. Tredoux y I. Dijkstra, 2004 (IAH).

CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE BALSAS DE INFILTRACIÓN. EJEMPLOS PRÁCTICOS. RECARGA ARTIFICIAL REALIZADA EN LA COMARCA DEL CARRACILLO, SEGOVIA.

Como criterios de diseño cabe destacar:

- La balsa debe localizarse en el lugar en que los materiales que constituyan la superficie de infiltración sean los más apropiados para favorecer la infiltración.
- La altura que alcanza el domo de agua por debajo depende, en gran medida, de la

geometría de la balsa y puede maximizarse empleando formas cuadradas o circulares en lugar de balsas estrechas y alargadas.
- Hay que tener en cuenta la situación del nivel freático y variación anual a la hora de diseñar la geometría y el dimensionado de la balsa.
- A la hora de construir la balsa es muy importante concienciar a los trabajadores de la necesidad de evitar actuaciones que reduzcan la conductividad hidráulica de la balsa. Algunas de estas actuaciones que se debe evitar es la compactación de tierras, creación de canales preferentes, etc.
- La balsa debe de una obra de entrada a través de un dispositivo que disipe la energía del flujo. También puede ir equipada con un sistema de desagüe, para situaciones eventuales de avenida.

Figura 2-07. Detalle de la surgencia con disipador en la balsa de Gomezserracín.

- Se debe instalar sondeos piezométricos en las inmediaciones de la balsa, para conocer el efecto del volumen infiltrado. Esta red de piezómetros también aporta otro beneficio, al permitir la liberación a la atmósfera del aire atrapado en el acuífero, favoreciendo así la infiltración.
- Debido a que la infiltración se produce durante la aplicación del agua en la balsa, los taludes no tienen que ser demasiado profundos, ya que el agua nunca llegará a sobrepasar la altura de los mismos. Sin embargo, se necesita dar una altura suficiente que permita proporcionar una mayor área en la parte más superficial de la balsa, ya que la infiltración se considera que tiene lugar por el fondo y por los taludes interiores.

A continuación se describen las especificaciones constructivas de las balsas de infiltración construidas en la Comarca del Carracillo:

Descripción de la balsa Oeste:

Esta balsa se construyó semiexcavada en el terreno y su capacidad es de 8.455,70 m^3. La cota de coronación de la balsa está situada a 813,00 m, con una anchura del camino de coronación de 2,00 m.

La zona de terraplén tiene forma trapecial, con un talud interior de 2,00 m en horizontal por 1,00 m en vertical y exterior de 3,00 m en horizontal por 1,00 m en vertical.

La altura máxima del terraplén respecto al fondo de la balsa será de 3,00 m, con una altura de lámina de agua de 1,30 m, quedando por tanto un resguardo de 1,70 m bajo la coronación. La máxima altura de terraplén, en el talud exterior de esta balsa, es de 1,30 m.

El talud de terraplén, aguas abajo de la balsa, se cubrirá con una capa de tierra vegetal, especies arbustivas y herbáceas de la zona.

El talud interior de la balsa se cubrió con escollera de entre 30 y 60 cm.

Se construyó una rampa situada en el talud de la balsa con una pendiente aproximada de 0,10 m/m. Esta rampa sirve como acceso al fondo de la balsa para poder proceder a su limpieza y así reducir la presencia de procesos colmatantes que reduzcan la tasa de infiltración en el acuífero.

Las características geométricas más destacables de la balsa se exponen a continuación:

- Cota de coronación 813,00 m
- Cota de fondo 810,00 m
- Cota del agua 811,30 m
- Talud interior 2H/1V
- Talud exterior 3H/1V
- Superficie de fondo de la balsa 6183,70 m^2
- Superficie lámina de agua máxima 6.994,45 m^2
- Superficie taludes interiores 2.224,24 m^2
- Superficie taludes interiores 854,60 m^2
- Volumen del embalse 8.455,70 m^3
- Anchura del camino de coronación 2,00 m
- Longitud del camino de coronación 376,00 m
- Volumen de desmonte total 13.895,00 m^3
- Volumen de terraplén total 1.606,95 m^3
- Superficie total de ocupación de balsa en planta 10.197,45 m^2

La entrada de agua por la parte inferior de la balsa se realiza mediante una válvula con disipador, que introduce el agua en el interior de la balsa. La tubería de entrada es una tubería de polietileno PN 6 de 400 mm de diámetro para el transporte de un caudal de 170 l/s.

Descripción de la balsa Este:

La capacidad de la balsa es de 9.275,20 m^3 y se construyó completamente excavada en el terreno. Su cota de coronación está a 803,30 m.

Los taludes tanto interior como exterior en desmonte son de 2,00 m en horizontal por 1,00 m en vertical.

El talud interior de la balsa se cubrió también con escollera de entre 30 y 60 cm.

Figura 2-08. Detalle del talud de la balsa de infiltración.

La altura máxima del terraplén respecto al fondo de la balsa será de 2,00 m, con una altura de lámina de agua máxima de 1,50 m, quedando por tanto un resguardo de 0,50 m bajo la coronación.

Al igual que en la balsa oeste, en esta balsa se construyó una rampa con una pendiente aproximada de 0,10 m/m como acceso al fondo de la balsa para limpieza y mantenimiento.

Las características geométricas más destacables de la balsa se exponen a continuación:

- Cota de coronación 803,30 m
- Cota de fondo 801,30 m
- Cota del agua 802,80 m
- Talud interior 2H/1V
- Talud exterior 2H/1V
- Superficie de fondo de la balsa 5.760,40 m^2
- Superficie lámina de agua 6.714,10 m^2
- Superficie taludes interiores 1.788,57 m^2
- Volumen del embalse 9.275,20 m^3
- Volumen de desmonte total 16.044,38 m^3
- Superficie total de ocupación de balsa en planta 7.360,15 m^2

La entrada de agua, al igual que en la balsa oeste, se ha realizado mediante un surtidor situado en la parte inferior de la balsa con una tubería de entrada de polietileno PN 6 de 400 mm de diámetro que transporta un caudal de 160 l/s.

2- Canales y Zanjas de infiltración

Tanto las zanjas como los canales son dispositivos de recarga artificial incluidos dentro del grupo de los sistemas superficiales, cuyo fin es aumentar la infiltración natural. A diferencia de las balsas, los canales tienen muchas menos necesidades en cuanto a la disponibilidad de suelo o pendiente del terreno. Además, la probabilidad de eutrofización de las aguas también es menor que en las balsas, ya que el agua circula continuamente por el canal.

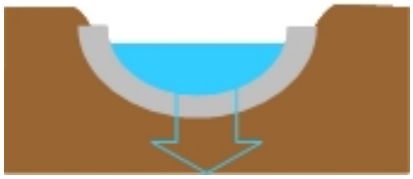


Figura 2-09. Icono que representa los canales de infiltración, diseñado para el desarrollo de mapas temáticos que asocian dispositivos con tipo de acuífero de modo automatizado, en el ámbito del proyecto DINA-MAR

La principal diferencia entre zanjas y canales es que, mientras que los canales suelen instalarse para conducir el agua a través de las zonas más permeables o guiarla hasta los reservorios aumentando la infiltración, las zanjas son estructuras de retención de aguas de escorrentía que, además de reducir significativamente la erosión de laderas, aumentan la infiltración natural, recargando así el acuífero subyacente.

Otra de las diferencias entre estos dos dispositivos de AR es que las zanjas suelen instalarse en serie, mientras que los canales suelen tener un trazado continuo.

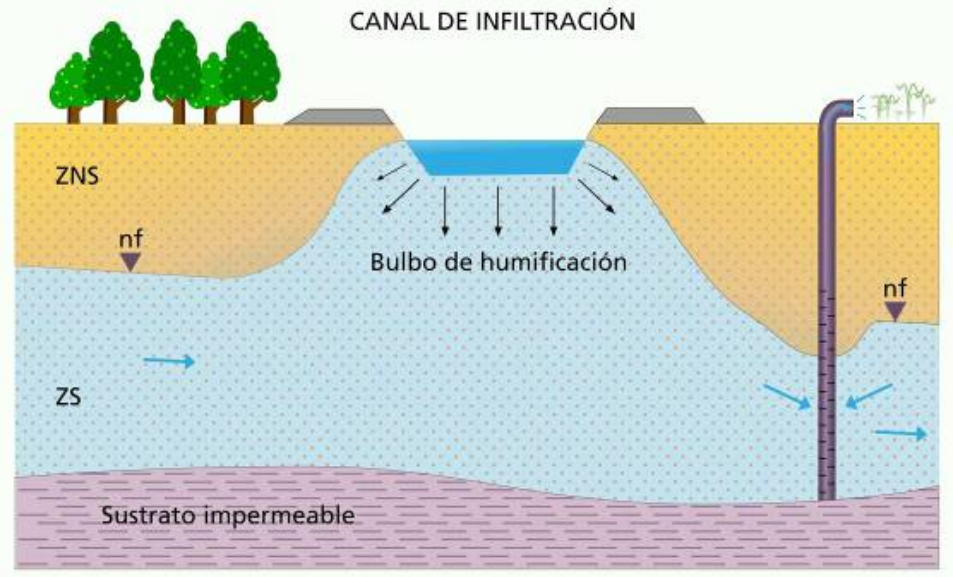


Figura 2-10. Esquema de un dispositivo de AR tipo canal de infiltración.

CANAL DE INFILTRACIÓN

Se entiende por canal de infiltración una construcción superficial destinada al transporte del agua de recarga artificial para favorecer la infiltración. El canal consiste en una estructura más o menos lineal excavada o sobre el terreno cuya sección tiene forma de trapecio invertido. Tanto el diseño como el trazado deben ser designados en función de las características hidrogeológicas, topográficas, sociológicas, etc. de la zona donde vaya a instalarse el dispositivo.

Debido a sus dimensiones más reducidas, pueden ubicarse en lugares con mayor pendiente que las balsas y donde la disponibilidad de terreno para la obra sea menor.

El trazado de los canales debe discurrir a lo largo de zonas con pendiente y que tengan la mayor permeabilidad posible, aumentando así la infiltración natural de agua en el acuífero.

El método de recarga es muy similar al de las balsas de infiltración. La principal diferencia es que el agua se infiltra “en movimiento”, incluso contando con dispositivos de parada intercalados. Este movimiento es lineal, aguas abajo, y al mismo tiempo se generan trayectorias turbulentas, remolinos, etc. en las inmediaciones de las represas, creando sectores “complejos”.

Los canales suelen construirse sobre acuíferos detríticos y sobre la superficie de alteración (regolito) de rocas duras, donde la recarga artificial se produce directamente desde el fondo del canal hasta el acuífero. Las características hidrogeológicas del medio receptor son bastante similares a las requeridas para la instalación de las balsas de infiltración, puesto que tienen mayor influencia las propiedades físicas superficiales (pendiente, disponibilidad de terreno) y la morfología tridimensional del acuífero que se pretende recargar.

En acuíferos rocosos, cuya permeabilidad es debida a la fracturación de la roca y al grado de alteración del “arenazo” superficial, pueden llegar a constituir un sistema de recarga muy importante, especialmente si se conoce la disposición de las fracturas colectoras, su magnitud y tipo de conexión de las distintas familias en el macizo rocoso.

Aunque la capacidad de almacenamiento de estos acuíferos rocosos suele ser bastante reducida, en determinadas regiones, especialmente áridas o semiáridas, puede ser la única fuente de agua durante las estaciones más secas del año.

Las coronaciones del canal suelen estar ligeramente elevadas sobre el nivel medio del terreno (banquetas recrecidas) para represar desbordamientos eventuales. En un lateral suele construirse una vía de servicio, para facilitar el acceso y el mantenimiento.

Para diseñar el trazado de los canales, es necesario un conocimiento avanzado de las características hidrogeológicas del acuífero como pueden ser las direcciones de flujo, el espesor de la zona no saturada, la capacidad de almacenamiento, la transmisividad, la caracterización estructural del macizo rocoso, etc.

Figura 2-11. Canal de recarga artificial situado en la Cubeta de Santiuste (Segovia).

Al igual que en otros dispositivos, uno de los principales problemas durante la fase de funcionamiento, son los procesos de colmatación que pueden reducir la infiltración del canal. Para minimizar lo máximo posible la obstrucción del dispositivo, es necesario realizar un mantenimiento similar al de las balsas de infiltración, adaptándose, claro está, a la morfología lineal de este dispositivo.

Debido a que el agua circula a lo largo de los canales, es menos frecuente que tengan lugar procesos de eutrofización en el fondo, como puede ocurrir en las balsas. El empleo de técnicas tipo SAT combinadas con este tipo de sistemas de recarga artificial, puede suponer una mejora sustancial del rendimiento del dispositivo, a la par que puede disminuir los problemas por colmatación y reducir el efecto Lisse.

El calado del caz, la pendiente motriz y la pendiente de los taludes, resultan ser aspectos esenciales del diseño de estos sistemas.

La erosión producida por el agua en la base del caz tras varios ciclos de recarga artificial puede afectar a la estabilidad del talud, produciendo deslizamientos y derrumbes que pueden evitarse con un revestimiento de dichas paredes mediante piedras o roca, mediante mampostería o gaviones. Siempre se debe tener en cuenta que este revestimiento puede influir en el pH de las aguas de recarga artificial por disolución del mismo, como puede ocurrir en el caso de un revestimiento con materiales carbonatados y unas aguas de recarga artificial ligeramente ácidas. Estos aspectos se contemplan en el capítulo 8.

Figuras 2-12 a) a d); a) y b) Deslizamientos en una ladera del caz (este) de recarga de la Cubeta de Santiuste, Segovia; c) y d) Caz de recarga revestido en la comarca del Carracillo, Segovia.

Un ejemplo de este tipo de canales sobre roca son las denominadas “Amunas” de Perú. Esta es una práctica ancestral de recarga artificial que consiste en aprovechar la estructura del terreno (fracturas o material superficial de alta permeabilidad), garantizando la disponibilidad de agua de los manantiales en la época mas seca (Apaza Idme, 2006).

Las “Amunas” más famosas se ubican en las montañas de Huarochiri, en las cuencas Lurin y Rimac (Lima), con el objeto de incrementar el volumen de agua de los manantiales a partir de las aguas de escorrentía que se producen en las microcuencas (Idme, 2006).

Otro ejemplo más cercano de recarga artificial a través de canales, son los careos, simas o acequias de guiadero de las Alpujarras (Granada y Almería). Se trata de unas antiguas acequias de origen árabe que aprovechan el deshielo de Sierra Nevada para recargar los acuíferos de las zonas regables de la falda sur (figuras 2-14).

Figuras 2-13 a) a c). Los canales de AR pueden discurrir sobre fracturas y discontinuidades favoreciendo y aumentando la recarga natural. Montañas de Huarochiri situadas en la cordillera Andina (Lima). Tomadas de Apaza Idme, 2006.

Figuras 2-14 a) a c). Varias perspectivas de los careos de Berchules y de Mecina ubicados en las Alpujarras, Granada.

El Grupo TRAGSA ha colaborado con el Parque Nacional en la reconstrucción de 14 acequias de careo o guiaderos con materiales tradicionales, manteniendo así un patrimonio cultural sin perder su originalidad (www.dina-mar.es).

EJEMPLOS DE DISEÑOS CONSTRUCTIVOS DE ALGUNOS CANALES. RECARGA ARTIFICIAL REALIZADA EN LA CUBETA DE SANTIUSTE, SEGOVIA.

En la Cubeta de Santiuste (Segovia) el dispositivo de recarga artificial consiste en un sistema superficial compuesto por balsas y canales, con el apoyo de pozos ocasionales.

El motivo de la elección de este tipo de dispositivo es que la ocupación del terreno es escasa, reduciendo la ocupación de los campos de cultivo, ya que la agricultura es el principal motor económico de esta zona. Otros factores importantes en la elección del tipo de dispositivo son la topografía, el drenaje y la geología de la zona.

La traza del canal aprovecha una pendiente media favorable del 0,28%. Por ello, el canal discurre en un 20 % de su longitud por el cauce de un antiguo arroyo seco, el arroyo de La Ermita.

Al diseñar la geometría del canal se tuvo en cuenta que se pretendía obtener la máxima superficie de infiltración posible con el caudal máximo del que se dispone. Para ello se intercalaron pequeñas represas u obras de parada a lo largo del canal, a distancias cercanas a 150 metros, que favorecen la infiltración. Estas represas son prefabricadas de hormigón (PTPs) y su elevación gestión ha quedado transferida a la comunidad de regantes con asesoramiento técnico.

Los cruces con caminos, carreteras etc. También son PTPs que, una vez instalados, solo hay que preocuparse de su mantenimiento.

Dimensionamiento de los canales

Según los estudios realizados para la recarga artificial en la zona (“Estudio de soluciones para la recarga del acuífero de la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia)”), la superficie de infiltración necesaria, en una primera etapa, para el caudal máximo de 1 m^3/s es de 21.600 m^2 siendo la longitud total del canal de 10.671'50 m.l.

A partir de estos datos se realizó el dimensionado del canal de recarga artificial. Se decidió adoptar una forma trapezoidal de 1,00 m. de base, 1,50 m. de altura, 4,0 m de anchura en coronación y taludes 1/1. A lo largo del mismo se construyeron las obras de parada en hormigón armado, y provistas de tajadera de 1 m de altura sobre las que se vierte el agua, de forma que el calado máximo sea de 1 m y el mínimo en cola de tramo sea 0,50 m en situación estática.

Tomando como valor de cálculo un calado medio de 0,75 m, se obtiene un valor del perímetro mojado de 3,12 m.

La longitud de canal necesaria era de 21.600 m^2/3,12 m.= 6.293 m. Sin embargo, se proyectó un canal de 10.671 m de longitud para conseguir una mayor homogenización del proceso de infiltración en todo el acuífero y suplir las deficiencias que se producirán por la colmatación y cubierta vegetal.

Debido a la conveniencia de construir un camino de servicio al lado del canal, la sección tipo cuenta con 2,00 m de altura y 4 m de anchura más cuneta. De ésta forma, el camino quedó 0,50 m. por encima de los terrenos de cultivo, represando posibles inundaciones. Se construyó con material procedente de la excavación del propio canal.

Obras de fábrica

En cuanto a las obras de parada, se instalaron tres tipos.

- Obras de parada en el canal.
- Obras de paso en cruces de caminos.
- Obras mixtas, de parada y de paso al mismo tiempo.

Las obras de parada consistieron en elementos prefabricados de hormigón armado que se colocaron sobre una solera de 0,20 m de espesor de hormigón H-125 para evitar diferencias de asentamiento de las piezas. Las obras se completaron con una protección de escollera, de 2 m de longitud aguas arriba y aguas abajo de las mismas, realizando la transición de sección trapezoidal a rectangular. Sus dimensiones totales, una vez montados, son 4,80 x 2,00 x 1,90 m. Algunos de ellos disponen de compuerta o tajadera de 1,00 m de altura que permite regular la infiltración.

Posteriormente, se realizó un segundo canal de recarga artificial semiparalelo al ya descrito en este apartado. Su dimensionado se basó en premisas similares.

ZANJAS DE INFILTRACIÓN

En el caso de las zanjas es necesario que exista una capa superficial de material blando que permita la ubicación de las zanjas en el suelo, a diferencia de los canales que pueden discurrir sobre la roca. Las zanjas no se pueden construir en terrenos totalmente erosionados, donde la roca madre queda expuesta en superficie.

Figura 2-15. Imagen de la construcción de una zanja de recarga siguiendo las curvas de nivel, para la captación del agua de lluvia. Tomado de WCT.

Las zanjas son estructuras excavadas en el terreno, con una morfología lineal y cuya sección es semicircular. Suelen ubicarse siguiendo las curvas de nivel, lo cual además de aumentar la infiltración también reduce los procesos de erosión.

Las zanjas son un dispositivo que se utiliza principalmente para reducir la erosión hídrica en laderas con altas pendientes. Generalmente se construyen de forma perpendicular a las líneas de máxima pendiente, con trazado semiparalelo a las curvas de nivel. Suelen contar con un canal de desborde para evitar la destrucción de la zanja en caso de fuertes lluvias.

Además de ser estructuras para reducir la erosión producida por la escorrentía superficial, permiten la recarga artificial de los acuíferos, ya que al retener el agua superficial, aumentan el tiempo de permanencia en la ladera y favorecen la infiltración.

CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE ZANJAS DE INFILTRACIÓN

El diseño de las zanjas, al igual que el de los canales, es uno de los aspectos más importantes y complejos, puesto que requiere conocer no solo la pendiente de la ladera, sino además la edafología (tipo de suelo y contenido en materia orgánica), la intensidad de la precipitación, el periodo de retorno, el coeficiente de escorrentía o la tasa de infiltración del suelo, además de las características hidrogeológicas del sustrato, ya mencionadas previamente.

Figura 2-16. Fotografía de una zanja de infiltración en Hidango (Chile) perteneciente al proyecto de investigación EIAS para la "Determinación de estándares de ingeniería en obras de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos para la conservación e incremento de la productividad silvícola" (2005). Tomado de Flores Villanelo, 2004.

A continuación se muestran algunos de los parámetros más importantes a tener en cuenta en el diseño e implantación de este tipo de sistemas de AR.

$$Vai = Vcz + Vin$$

- V_{ai}= Volumen de aportación zona de impluvio.
- V_{cz}= Volumen de captura zona de zanjas.
- V_{in}= Volumen de infiltración de la zanja

$$Vai = P \times S \times e$$

- V_{ai} =Volumen de aportación zona de impluvio. (m^3)
- P= Precipitación (máxima en 1 hora)
- S= superficie de impluvio
- e = coeficiente de escorrentía

$$Vcz = b \times h \times l$$

- V_{cz}= Volumen de captación de las zanjas. (m^3/h)
- b= Base de la zanja en metros
- h= Altura de la zanja en metros
- □ = Largo de la zanja en metros

$$Vcz = b \times v \times l$$

- V_{cz}= Volumen de infiltración (m^3/h)
- b= Base de la zanja en metros
- v= Velocidad de infiltración de la zanja en metros
- □= Largo de la zanja en metros

$$d = \frac{b \times (h + v)}{P \times e}$$

- d= distanciamiento entre zanjas de infiltración

Nota: Las formulas para el diseño de zanjas de infiltración se han obtenido del proyecto de investigación EIAS (2005), proyecto conjunto de la Universidad de Talca (Chile) con la Universidad Politécnica de Madrid (España).

En consecuencia, en laderas con grandes pendientes suelen construirse gran cantidad de zanjas estrechas pero con mayor profundidad, mientras que en laderas suaves las zanjas pueden llegar a tener varios metros de ancho. A su vez, si la inclinación de la ladera donde van a instalarse las zanjas de infiltración está comprendida entre el 2% y el 45 % es recomendable construirlas siguiendo las curvas de nivel.

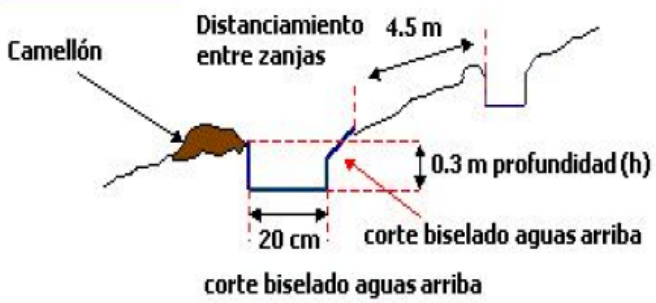


Figura 2-17. Ejemplo de la sección vertical de una zanja de infiltración, en la que pueden diferenciarse las distintas partes que la forman. Tomado de Flores, 2004.

Cuanto mayor sea la pendiente de la ladera, mayor será la velocidad del agua y la escorrentía, por lo tanto, en laderas con altas pendientes, la distancia entre zanjas debe ser menor, con objeto de posibilitar la infiltración del mayor volumen posible de agua del escurrimiento superficial.

Ensayo	Distanciamiento entre líneas de zanjas (metros)		Intensidad máxima horaria de diseño (mm/h)	Intensidad máxima registrada en terreno (mm/h)	Velocidad de infiltración (mm/h)
	Zanja tipo 1 (base 0,2 m)	Zanjas tipo 2 (base 0,3 m)			
Hidango	4,0	6,0	15,8	16,2	89,3
Name	4,0	6,0	17,6	16,2	20,3
Manzanares	4,5	6,5	19,0	9,4	72,0
Llohué	9,0	13,0	19,0	9,4	451,3

Figura 2-18. Distanciamiento óptimo entre líneas de zanjas y número de líneas de zanjas dentro de cada ensayo. Resultados pertenecientes al proyecto de investigación EIAS para la “Determinación de estándares de ingeniería en obras de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos para la conservación e incremento de la productividad silvícola” (2005). Tomado de Flores, 2005.

Otro factor importante para el diseño de las zanjas de infiltración es el tipo de suelo, ya que la capacidad de infiltración varía según la estructura, textura, contenido en arcilla y materia orgánica, etc. De cada suelo. Por lo tanto, cuanto más gruesa sea la textura del suelo, mayor será la velocidad de infiltración y menor la distancia entre zanjas.

Otro elemento a tener en cuenta es la cantidad de agua que debe capturar cada zanja, para lo cual deben considerarse parámetros habituales en la modelación hidrológica, tales como el caudal punta, el área de la cuenca, la intensidad de la precipitación o el periodo de retorno.

Las zanjas de infiltración utilizadas para la recolección de agua de escorrentía, deben incluir un canal de desborde para evacuar el exceso de agua. Esta agua que no puede infiltrarse en el suelo durante periodos de intensas lluvias es canalizada mediante el canal de desborde, hasta la zanja más próxima. En caso de ser necesario, pueden construirse estanques o pozos de infiltración, para almacenar los excedentes de escorrentía que provienen de las zanjas.

El correcto funcionamiento de estos dispositivos está directamente relacionado con su mantenimiento, ya que procesos como la sedimentación reducen la capacidad de infiltración, y por ende, disminuyen la efectividad y la vida útil del dispositivo.

3- Técnicas de tratamiento suelo/acuífero

La reutilización de aguas es cada vez una alternativa más importante a tener en cuenta, en un momento en que el aumento de la demanda y el respeto por el medio ambiente aumentan de forma pareja. Las técnicas de tratamiento suelo acuífero también llamadas SAT *(Soil Aquifer Treatment),* se posicionan como una importante alternativa a tener en cuenta, que convierte un problema, como es la eliminación de las aguas residuales, en un recurso.

Conviene mencionar que las técnicas SAT se consideran, en general, como una forma de reutilización de aguas regeneradas, pero que el origen del término es bastante más amplio. En su connotación holandesa se entiende como un conjunto de actuaciones sobre el agua o el medio receptor para incrementar la tasa de infiltración en el acuífero mediante intervenciones en el suelo, en el propio acuífero y en el agua a recargar (Krul & Liefrinck, 1946).

La inclusión de este tipo de sistemas en el proceso de recarga artificial de las aguas subterráneas presenta múltiples ventajas, por la mejora que supone en la calidad de las agua de recarga artificial, reducción de los costes de depuración y una mejor aceptación pública (Bouwer 2002).

Las técnicas SAT más habituales están encaminadas a extraer o minimizar ciertos contaminantes de las estructuras de AR, especialmente compuestos orgánicos y nitrogenados, reducir la colmatación física, biológica y química, la eliminación de los sólidos en suspensión y microorganismos, así como la reducción de fosfatos, metales y aire disuelto en el agua mediante actuaciones preventivas o bien curativas.

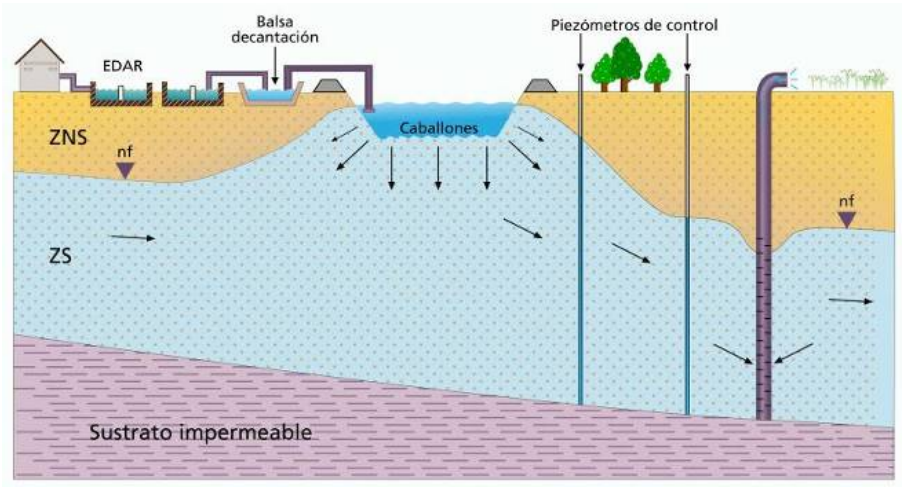


Figura 2-19. Esquema de un dispositivo tipo SAT.

Estas técnicas pueden inferir bien en el medio receptor (caracterización de ambientes), en los dispositivos de recarga artificial (estructuras de obra), en el agua a recargar (especialmente en cuanto a su pretratamiento se refiere) o en las combinaciones de

éstos. La aplicación de estas técnicas se prolonga además hacia etapas posteriores, en las que sea preciso llevar a cabo operaciones de limpieza y mantenimiento y un seguimiento de la evolución del acuífero y de la efectividad de las actuaciones (Fdez. Escalante, 2005)

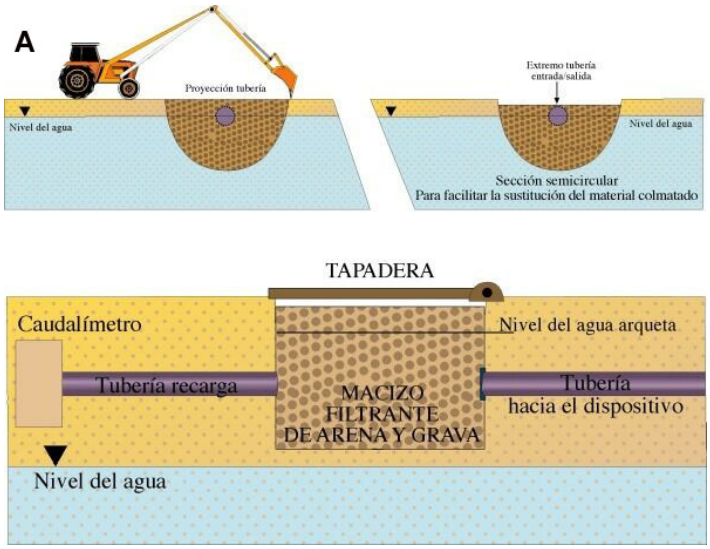


Figura 2-20. Ejemplo de una aplicación de técnicas tipo SAT. Tomado de Fdez. Escalante, 2005.

Entrando en las distintas líneas de investigación llevadas a cabo, la mayoría de los autores coinciden en que el pretratamiento de las aguas es la medida más efectiva para lograr altas tasas de infiltración (*Leenheer, 2002; De los Cobos, 2002*, etc.).

El pretratamiento del agua de recarga artificial suele ser complicado y costoso. Son deseables tasas por debajo de 2 ó 3 mg/l de materia en suspensión, así como la eliminación de los nutrientes y materia orgánica del agua, para conseguir la mayor vida útil del pozo *(Bouwer, 2002 y MIMAM, 2002).* Este objetivo se lleva a cabo de diversas maneras, tales como la filtración para la reducción de la turbidez, el Total de Sólidos en Suspensión (TSS) y el Carbono Orgánico Total (COT); factores que condicionan en gran medida la colmatación química y biológica *(bioclogging).* Otra técnica SAT clásica es la adición de *desinfectantes* o *DBPs (Disinfection By Products)*. A este respecto hay experiencias de todo el mundo, mediante cloración, microfiltración; iodación, ozonificación y radiaciones ultravioleta; aditivos para el control del pH; la combinación de distintas técnicas de forma simultánea; control de la temperatura del agua, intervención en los gases disueltos, etc., originando casos positivos, negativos y frecuentes sinergismos (en Fdez. Escalante 2005).

Además de la composición de las aguas, es preciso conocer la del suelo y la del acuífero, para prever los resultados de la interacción entre las aguas de recarga artificial y el medio receptor y diseñar una actuación específica para cada caso *(Leenheer, 2002).*

Como reglas de aplicación general a las técnicas SAT para todos los métodos y dispositivos de AR cabe destacar las siguientes (en Fdez. Escalante 2005):

- Tratamiento adecuado de las aguas de recarga artificial y/o empleo de aguas de buena calidad para este fin (Pérez-Paricio et al., 2001).
- Minimizar la aireación de las aguas y el efecto Lisse.
- Recargar a velocidades lentas de las aguas, evitando el batido de las mismas, el *cascading*, etc. (Pérez-Paricio, 2000).
- Minimizar la corrosión de las estructuras y oxigenación de las aguas, controlando las condiciones oxidantes, recargando con aguas a temperaturas mayores que las aguas del acuífero, etc.
- Control de ciertos parámetros, evitando una concentración superior a la fijada en el estándar de calidad aplicable según la legislación del país donde se lleven a cabo las operaciones. En algunos parámetros hay quórum a nivel mundial, por ejemplo el agua de recarga artificial deberá tener menos de 10 ppm de turbidez o sólidos en suspensión (TSS).
- Diseño adecuado de las estructuras con dispositivos de aviso y alarma al sobrepasar la profundidad de alerta.
- Los aportes extras de oxígeno, además de minimizar la tasa de infiltración, aceleran la precipitación de hierro; mientras que las pérdidas de CO2 aceleran la precipitación de carbonatos en el medio receptor.

Algunas actuaciones son cuestionables según distintos autores y no resultan positivas en algunas situaciones. Por ejemplo, la reducción de colonias bacterianas, nutrientes y algas mediante el empleo de productos químicos, la limpieza de la superficie de infiltración y costras calcáreas con ácidos, etc. (en Fdez. Escalante, 2005).

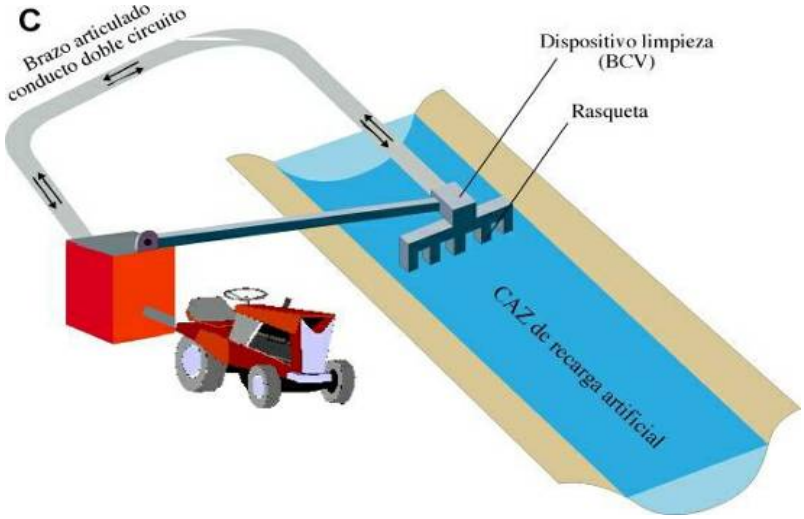


Figura 2-21. La combinación de las técnicas SAT junto con otro tipo de sistemas de recarga artificial mejora la efectividad del dispositivo y reduce considerablemente los costes de mantenimiento. Tomado de Fdez. Escalante, 2005.

En el caso de las aguas regeneradas, tras su paso por el suelo y el acuífero, pueden ser utilizadas tanto para riego, usos municipales, recreativos, etc. Sin embargo su uso para consumo humano queda restringido por el contenido en carbono orgánico y contaminantes emergentes. Esto hace necesario la utilización de otro tipo de sistemas de depuración previos a los SAT, como son la osmosis inversa, los filtros de carbono o la dilución con aguas subterráneas nativas (Gale, 2005).

Un ejemplo de este tipo de técnicas es la planta de tratamiento de Shafdan, en Tel Aviv, donde se derivan un total de 300.000 m^3 de agua residual al día para su tratamiento y producción de agua para uso agrícola.

Figura 2-22. Vista panorámica de la planta de tratamiento de aguas residuales en Shafdan (pretratamiento, reactores biológicos y clarificadores). Tomado de Quipuzco Ushñahua, 2004.

El efluente de la planta de tratamiento es conducido hasta unos campos de infiltración ubicados en un sistema dunar para su depuración y para la recarga artificial del acuífero.

El área de recarga tienes unas dimensiones aproximadas de entre 25 y 60 ha. Al infiltrarse el agua a través del suelo hasta el acuífero, se cumple un triple propósito: filtración, desinfección y almacenamiento. El efluente infiltrado permanece en el acuífero alrededor de 400 días, después es extraída mediante bombeos y es utilizada para el regadío al sur de Israel.

4- Campos de infiltración (inundación y difusión controlada)

Este tipo de dispositivo de recarga artificial es una antigua forma de gestión de los recursos hídricos muy utilizada en zonas áridas y semiáridas. Una de las regiones donde más se practica es en Pakistán, aunque también es muy utilizado en Asia, Yemen, el Cuerno de África y África del Norte. En el caso de DINA-MAR, se ha ensayado escasamente este tipo de dispositivo en la comarca del Carracillo.

La derivación de aguas para inundación o *"Water Spreading"* es una técnica que consiste básicamente en forzar al flujo de agua a salir de su álveo natural, por ejemplo a través de un sistema de canales o bordos, hacia los campos cultivados.

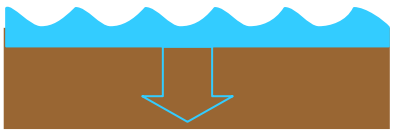


Figura 2-23. El icono representa el dispositivo de campos de infiltración, diseñado para el desarrollo de mapas temáticos.

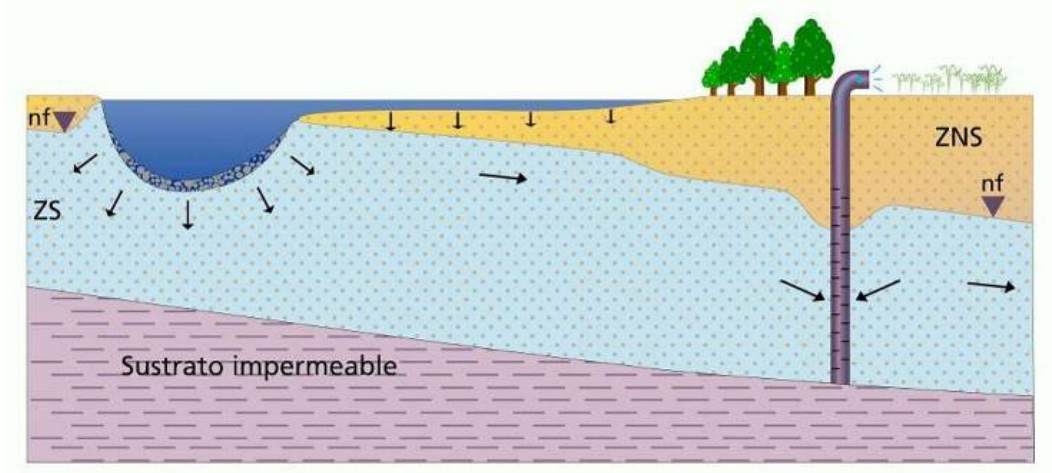


Figura 2-24. Esquema de un dispositivo tipo campo de inundación.

Normalmente este tipo de dispositivo se utiliza en regiones donde las precipitaciones anuales son irregulares y no suelen superar los 200mm. Para la implantación de estos sistemas de AR suele ser necesario disponer de extensas llanuras de fondos planos y permeables (llanuras aluviales) en las que llevar a cabo la inundación.

La derivación a través de canales del agua del río permite la difusión controlada de una lámina de agua a lo largo de una gran superficie. Esta lámina se desplaza sobre la superficie a muy baja velocidad, alterando mínimamente la superficie del suelo. Para controlar en todo momento la lámina de agua deben instalarse en los márgenes de la llanura de inundación bancos o zanjas que la rodeen completamente y eviten la inundación de zonas no deseadas.

Figura 2-25. Campo de inundación en la región del Carracillo, Segovia.

La capacidad de infiltración del suelo depende, en gran medida, de sus características, como son la textura, estructura, contenido en materia orgánica, etc. Así en este tipo de dispositivo, los mayores valores de infiltración se dan en suelos que conservan la vegetación y la capa superficial permanece intacta.

Estas tierras inundadas funcionan como humedales de forma temporal y presentan unas funciones ecológicas importantes y simultáneas, tales como:

a) Hábitat para la vida silvestre.
b) Recarga artificial de acuíferos (AR o MAR).
c) Control de inundaciones.
d) Mejora de la calidad del agua y de la fertilidad del suelo a través de transformaciones biogeoquímicas.

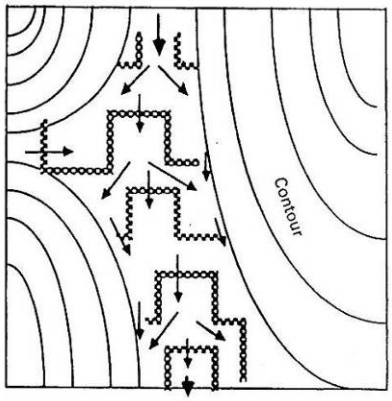
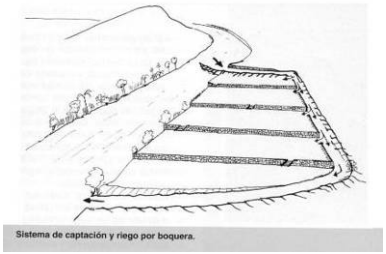
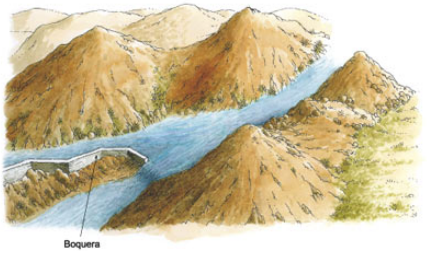


Figura 2-26. Diagrama esquemático del diseño de las barreras utilizadas para esparcir el agua de escorrentía sobre la llanura de inundación para el riego de las Granjas Nabateas en el desierto de Negev. Tomado de Evenari y Koller, 1956.

En Pakistán se lleva a cabo un ejemplo de este tipo de sistemas de AR. El dispositivo consta de unos muros de tierra que miden cerca de 1 km. de largo y varios metros de

altura, con una base de hasta 20 m de anchura. El agua es conducida hasta los campos de inundación, que llegan a ocupar unas 15 ha.
Un ejemplo en España de la utilización de este tipo de sistemas de recarga son las denominadas “boqueras”. Estos sistemas son obras hidráulicas destinadas a la captación de aguas, generalmente de avenidas o escorrentías, que de otro modo probablemente serían desaprovechadas.





Figuras 2-27 a) y b). Dos esquemas de un sistema de boqueras del sur de España. Tomado de a) Muñoz, 2003; b) Murcia y el agua. Historia de una pasión, 2005.

Suelen darse en zonas áridas del este y sureste español, como la Sierra de Espadán (Castellón), Almería, etc. En esta última provincia son destacables las existentes en la antigua vega junto a la desembocadura del río Andarax, cuyos dos principales objetivos eran:

1. Captación para uso agrícola de las avenidas del río.
2. Sistemas de evacuación de caudal del río, en caso de avenidas amenazadoras. Solían recibir nombres propios (Careaga, Carmení, de la Ciudad, de Orozco, de la Obra Pía, etc.).

Partes importantes de estos dispositivos de recarga artificial mediante sistemas de inundación son:

- La presencia de cursos de agua turbulentos e intermitentes para la captación y derivación desde el lecho del río hacia las tierras de cultivo.

- La existencia de un área suficientemente extensa y de poca pendiente para la distribución del agua proveniente del cauce fluvial. Suele ser necesaria la presencia de una vía alternativa que actué como aliviadero para el exceso de agua.

- El agua que se deriva durante la época de inundaciones es utilizada para el riego, el llenado de los estanques de agua y la recarga artificial de las aguas subterráneas; lo cual proporciona un gran número de oportunidades para la reactivación y la mejora de la productividad agrícola y la producción ganadera.

- Ésta es una de las técnicas de difusión más rentable, sin embargo es imprescindible la disponibilidad de grandes superficies de tierra. Además los canales y zanjas pueden ser construidos con materiales y mano de obra locales, lo cual reduce los costes de la obra y produce un impacto socioeconómico claramente positivo en la zona.

Figuras 2-28 a) y b). a) Fotografía de un ejemplo de recarga artificial mediante campos de infiltración en el Río Omdel (Namibia), Tomada de IAH; b) desarrollo de las operaciones de mantenimiento de unos campos de infiltración en Eritrea. Tomado de F. van Steenbergen.

Es importante prestar especial atención a algunos aspectos concretos para el correcto funcionamiento del dispositivo, como son:

- El agua que llega hasta las zonas de inundación proviene de las partes altas de la cuenca, con lo cual es importante una gestión conjunta de toda la cuenca.

- La vida útil de los dispositivos puede variar considerablemente, ya que las estructuras de control presentan un alto riesgo de destrucción debido a las frecuentes inundaciones y a los cambios impredecibles en el lecho del río de toma.

- La gestión y control de la carga de sedimentos que transporta el cauce es tan importante como la gestión de las avenidas de agua. Igualmente la recarga del acuífero superficial y la conservación de la humedad del suelo son claves para una alta productividad.

- Debido a las inundaciones, se producen grandes acumulaciones de sedimento en la superficie, lo cual puede ser rentable para la agricultura de la zona, pero puede reducir significativamente las tasas de recarga artificial del dispositivo. Por ello es preciso un mantenimiento de las llanuras, diques y canales de desviación (Esfandiari-Baiat y Rahbar, 2004).

Uno de los problemas que presenta la dispersión del agua en los campos de infiltración es su diseño en secciones. Estas divisiones implican una dispersión del agua generalmente irregular durante la época de lluvias.

La primera sección o área del campo de infiltración recibirá más agua que la segunda y esta más que la tercera y así sucesivamente. Por ejemplo un dispositivo que hubiese funcionado durante 3 periodos de inundaciones y que constase de tres secciones de igual tamaño, la tercera sección sólo se habría inundado una vez, mientras que la segunda lo habría hecho dos veces y la primera tres. Esto genera un problema debido a la heterogeneidad en la infiltración y la falta de control en el volumen real de agua infiltrada. Esta ineficiencia en el sistema de recarga artificial trae como consecuencia una importante disminución de la superficie que originalmente se planificó recargar o regar. Por este motivo, resulta recomendable que cada sección tenga distinto tamaño, o

bien que cuente con un canal que llene solamente una vez cada una de las zonas de infiltración.

Otro problema es que esta técnica de recarga artificial no proporciona una productividad regular a lo largo del tiempo, sino que se asocia a grandes fluctuaciones en los ingresos según el carácter hidrológico de cada año.

Un adecuado mantenimiento de estos dispositivos es primordial para lograr el máximo rendimiento y evitar posibles inundaciones por rotura de los canales. Debe llevarse a cabo una limpieza y conservación de los distintos elementos: canales de conducción, derivación, muros de retención, etc., durante todo el año, ya que los riegos no son programados, como no lo son las precipitaciones, y el dispositivo debe estar disponible de forma permanente.

Todo esto hace necesaria la creación de una fuerte organización local que lleve a cabo el mantenimiento de los dispositivos.

5- Recarga accidental por retornos de riego

Históricamente el exceso de agua de riego en los canales y campos de cultivo ha causado numerosos problemas por inundación y salinización de los suelos. Sin embargo, cuando este exceso de riego esta controlado y gestionado correctamente, puede convertirse en una técnica de recarga artificial de los acuíferos subyacentes.

Figura 2-29. El icono representa la recarga accidental mediante retornos de riego.

Por ejemplo en las llanuras indias de la región del Ganges, el nivel freático subió en torno a 6 m en un periodo de 10 años, utilizando cada vez más agua para el riego, incluso fuera de las épocas de riego de la cosecha.

Figura 2-30 Campo de arroz, regado con aguas regeneradas en la provincia de Badajoz.

Según datos del Instituto Internacional de Gestión del Agua (2002), se estima que alrededor del 60% del agua utilizada para el riego del cultivo de arroz es consumida por la planta, mientras que el 40% restante se filtra a las aguas subterráneas, lo cual representa un volumen importante de agua para AR.

Algunas modificaciones en la morfología de los canales de riego permiten aumentar la recarga natural de las aguas subterráneas.

Figuras 2-31 a) y b). a) Sistema de riego mediante Pivots; b) Riego mediante surcos.

Dentro de los diferentes tipos de riego que suelen utilizarse, los de superficie son los más indicados para la recarga artificial de acuíferos, y en especial, los canteros y los surcos.

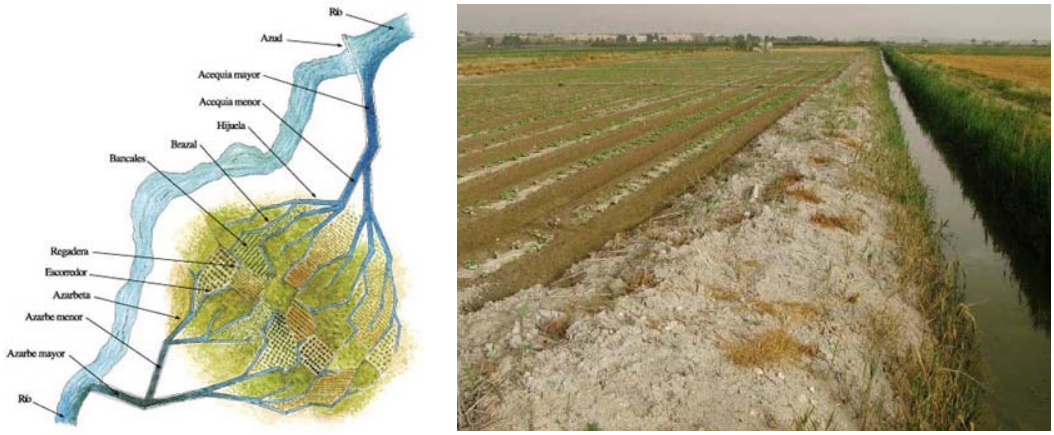
CLASIFICACIÓN	SISTEMAS DE RIEGO	APTITUD PARA RECARGA ARTIFICIAL
Superficie	Canteros	SI
	Surcos	SI
Aspersión	Fija	NO (por criterios de diseño)
	Semi-fija	NO (por criterios de diseño)
	Pivots y ranger	NO (por criterios de diseño)
	Microaspersión	NO (por criterios de diseño)
Localizado	Goteo superficial	NO (por cantidad de agua aportada)
	Goteo subsuperficial	DUDOSO (por cantidad de agua aportada)
	Microaspersión	NO (por cantidad de agua aportada)
	Tubería de exudación	NO (por cantidad de agua aportada)
Riego subterráneo		SI

Figura 2-32. La tabla muestra relación entre los diversos tipos de sistemas de regadío y la posibilidad de ser utilizados para la recarga artificial de acuíferos. Tomado de Martínez Tejero, 2008 (en memoria técnica de DINA-MAR).

Un ejemplo de reutilización de aguas de riego en España, son los azarbes. Las redes de azarbes permiten recoger las aguas sobrantes del riego y conducirlas a otros puntos de utilización situados aguas abajo.

Normalmente están constituidos por zanjas trapezoidales sin revestir, que forman una red ramificada de sección creciente, que desagua en los arroyos de la zona. Parte del agua, procedente de los excesos de riego, puede ser utilizada para recargar

artificialmente los acuíferos, infiltrándola directamente desde el azarbe al suelo o utilizando otro sistema de recarga artificial como pueden ser los pozos abiertos de infiltración.



Figuras 2-33 a) y b). Complejo sistema de acequias y azarbes de Murcia; b). Azarbe en Alicante. Tomadas de: a) Murcia y el agua. Historia de una pasión, 2005; b) Parc Natural Agrari Els Carrissals.

Se trata de redes de gran importancia, pues al drenar el terreno evitan su encharcamiento y la consiguiente salinización. Su construcción, explotación y mantenimiento están sujetos a los mismos criterios y condicionantes que las redes de distribución, aunque requieren limpiezas más frecuentes por la proliferación de carrizos, eneas y otras plantas hidrófilas.

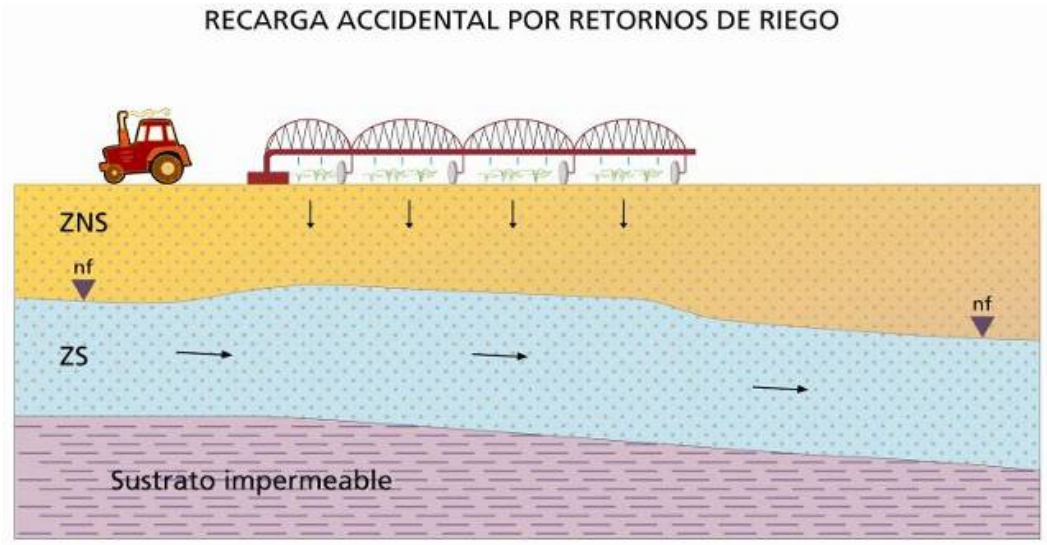


Figura 2-34. Esquema de la recarga artificial mediante retornos de riego.

La utilización de aguas regeneradas para el riego puede plantearse como un práctico sistema de reutilización y recuperación de las aguas, sin embargo, esto puede producir problemas en la calidad de las aguas subterráneas. Por ejemplo, en los alrededores de las ciudades de León y la Ciudad de México (México), los niveles de agua subterránea se han visto rápidamente reducidos debido al aumento de la demanda de agua, que supera en gran medida a la recarga natural. Aquí el uso de las aguas residuales municipales para riego agrícola es ampliamente utilizado. Esto ha dado generado problemas de contaminación de las aguas subterráneas por contaminantes industriales de muchos tipos.

El principal impacto cualitativo sobre las aguas subterráneas es la presencia a profundidades de 50 a 100 m de concentraciones de cloruro de 800 a 1000 mg/l (Chilton *et al.,* 1998), cuando el límite legal de las aguas potables se establece en 250 mg/l, según RD.140/2003. Gran parte del resto de los contaminantes presentes en las aguas residuales se eliminan o atenúan durante su paso por el sistema de distribución, el suelo y la zona no saturada. Esto ayuda a evitar que contaminantes como carbono orgánico, nutrientes, metales pesados y patógenos puedan alcanzar la masa de agua subterránea (Chilton *et al.,* 1998).

Sin embargo la utilización de estas aguas residuales combinadas con algún tipo de técnica SAT puede mejorar su calidad y permitir su utilización de una manera más amplia, tanto para riego, recuperación de acuíferos sobreexplotados, luchar contra la intrusión marina, regeneración de humedales, etc.

MODIFICACIÓN DEL CANAL (6-11)

Dentro del grupo de técnicas superficiales de recarga artificial también se engloban las actuaciones que implican modificaciones o cambios en los cauces de los ríos. Aunque este tipo de técnicas también se realizan desde la superficie, la zona no saturada no interviene de una forma tan directa en el proceso de recarga artificial, ya que la infiltración se realiza desde el lecho del río. Mientras que en los dispositivos pertenecientes a los métodos de dispersión la zona saturada siempre actuaba como sistema auto-filtrante del agua de recarga artificial, en esta serie de sistemas no siempre ocurre así. Al producirse la recarga artificial a través de la zona subálvea del río, el agua de recarga puede llegar directamente desde ésta hasta el acuífero en "control vertical".

En los casos en los que las precipitaciones son de tipo torrencial, el río raramente llega a conectar directamente con el nivel freático, ya que el tiempo de permanencia del agua en la cuenca no suele ser muy alto (sistema de diques). En el resto de los casos, aunque el río no esté conectado con el acuífero, el avance del bulbo de humidificación a medida que se realiza la recarga artificial llegará a interconectar el río y el nivel freático local.

Este grupo de sistemas de recarga artificial mediante modificación del canal, tal y como muestra la clasificación de la figura 2-112, incluye varios tipos de diques, los cuales conforman diferentes tipos de dispositivos de recarga artificial como son: los diques de retención y represas, diques permeables o presas de arena, diques subsuperficiales, subterráneos y perforados.

Dentro de este grupo, los diques perforados y los de retención o represas son dispositivos que se instalan en la superficie del cauce fluvial, y almacenan o represan el agua, aumentado el tiempo de permanencia del agua en la cuenca/subcuenca y favoreciendo la infiltración natural.

Otro tipo de dispositivo son las presas de arena que, a diferencia de los dos anteriores, aumentan la capacidad de almacenamiento, creando un "acuífero artificial" aguas arriba de la presa.

Los diques permeables no retienen ni desvían completamente el flujo de agua, sino que lo represan parcialmente y permiten que parte del caudal fluya a través ellos.

En cuanto al último de los cuatro tipos de diques mencionados anteriormente, las presas subsuperficiales, son diques subterráneos cuya función es optimizar la capacidad de almacenamiento del acuífero subyacente, reteniendo el flujo subterráneo de agua. Para ello es preciso conocer bien la estructura tridimensional del acuífero.

La implantación de este tipo de diques necesita de un estudio previo realizado por personal cualificado para su adecuada construcción, ya que existen numerosos aspectos técnicos que hay que considerar, como son las precipitaciones medias, el caudal de los ríos, arroyos y líneas de drenaje, la porosidad y textura del suelo, la

salinidad del agua, la capacidad de almacenamiento del acuífero, la profundidad del nivel freático y del sustrato impermeable, etc.

También resulta imprescindible considerar los posibles impactos de la obra, tanto negativos como positivos, ya que afecta tanto al flujo natural tanto de los ríos como de las aguas subterráneas.

En general el mantenimiento de este tipo de dispositivos esta a cargo de las comunidades locales, que deben encargarse de realizar inspecciones rutinarias, así como trabajos de limpieza y reparación de las instalaciones. De esta forma se asegura el buen funcionamiento y recuperación de los costos invertidos en la construcción del dispositivo de AR.

Todos los diques deben incluir en su construcción un disipador en la base de la presa, cuya finalidad es evitar la destrucción y erosión del terreno situado aguas abajo del dique que produce el impacto producido por la caída del agua.

6- Diques de retención y Represas

Una variante de las grandes presas, pero a menor escala, son los diques de retención y represas o *levees*. Los diques que se construyen transversalmente en el cauce de un río con el fin de contener y canalizar la escorrentía superficial, mientras que las represas se sitúan en cauces con caudal permanente durante todo el año. En ocasiones de utilizan estructuras flotantes.

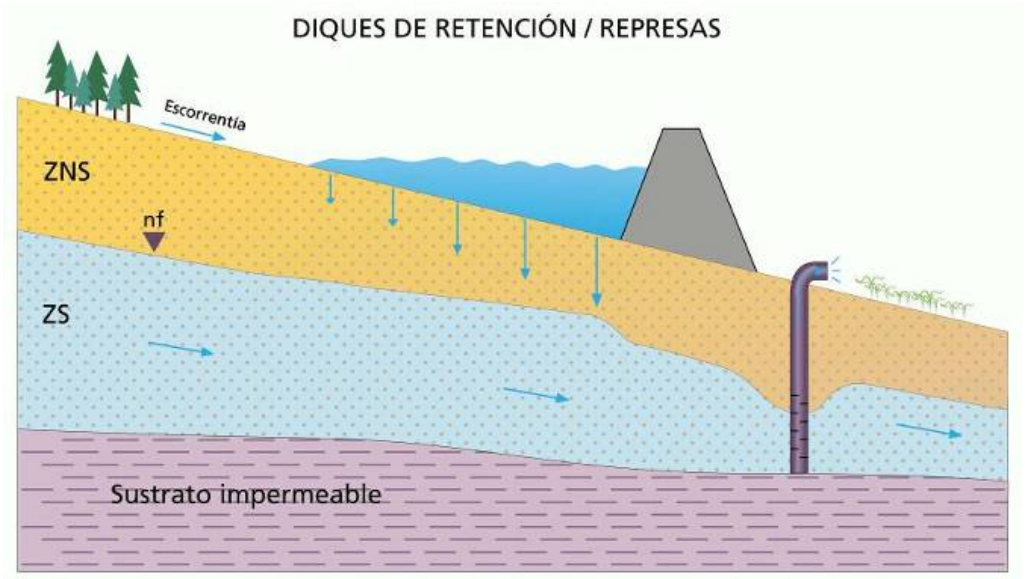


Figura 2-35. Esquema de un dispositivo de recarga artificial, tipo diques de retención/represa.

Tanto en el caso de las represas como de los diques de retención, el agua almacenada suele ser extraída mediante pozos o bombas desde el propio acuífero o desde el banco del río.

DIQUES Y PRESAS DE RETENCIÓN

En ingeniería se denomina presa o represa a un muro fabricado con piedra, hormigón o materiales sueltos, que se construye habitualmente en una cerrada o desfiladero sobre un río, arroyo o canal, con la finalidad de contener el agua en el cauce fluvial para elevar su nivel, con el objetivo de derivarla para riego, aprovechamiento en abastecimiento o para la producción de energía mecánica.

En las regiones donde las lluvias son intermitentes y discontinuas, con fuertes tormentas o la pendiente del terreno es elevada, el agua superficial discurre a gran velocidad sobre el terreno, reduciéndose significativamente su capacidad de infiltración, además de generar intensos procesos de erosión hídrica.

La construcción de estas presas reduce la energía mecánica de la escorrentía superficial y aumenta el tiempo de concentración y residencia del agua en la cuenca, favoreciendo la infiltración natural en el terreno (siempre y cuando éste sea apropiado).

Los diques de retención deben constar de un aliviadero que permita la salida del exceso de agua, evitando que ésta llegue a desbordar por los laterales del dique, con lo que podría dañar seriamente la estructura del mismo. Además como ya se ha mencionado anteriormente, debe contar con un disipador en la parte de la presa situada aguas abajo, para minimizar la erosión y deterioro de la estructura debido al salto del agua.

La presa debe construirse con materiales impermeables como piedras, ladrillo u hormigón para evitar las pérdidas por filtración por el cuerpo de la presa. Ocupa el ancho total del cauce del río.

Para reducir los costes de la construcción deben emplearse tanto materiales como mano de obra locales.

Si se construyen este tipo de estructuras a lo largo de una red de drenaje, además de aumentar la recarga natural del acuífero, puede conseguirse reducir la erosión y el transporte de sedimentos, procesos que suelen ser muy intensos en este tipo de ríos.

REPRESAS

Los cauces fluviales cuyo flujo anual es permanente, permiten la instalación de otro tipo de dispositivo, las represas. Éstas están constituidas por una serie de barreras dispuestas transversalmente al cauce del río, sin llegar a bloquear totalmente el flujo del agua. Estas barreras ralentizan la velocidad del agua en el canal, favoreciendo la infiltración de ésta en el subsuelo y recargando así al acuífero.

Al igual que en los otros tipos de estructuras de retención, debe existir un acuífero superficial no confinado, con una capacidad de almacenamiento y permeabilidad suficientemente alta y una profundidad freática suficientemente profunda.

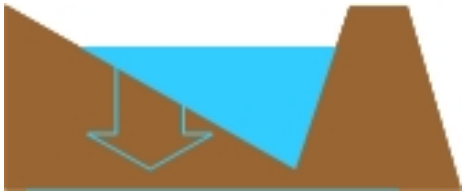


Figura 2-36. El icono representa el dispositivo de recarga mediante diques de retención/represas, diseñado para el desarrollo de mapas temáticos.

Las barreras se disponen alternativamente en los distintos lados del canal para frenar la velocidad del agua. Son estructuras lineales, fijadas en el lecho del cauce fluvial mediante grúas u otro tipo de maquinaria y fabricadas con materiales impermeables.

7- Diques permeables / Presas de arena

Al igual que en el aparatado anterior, existen diversos tipos de diques por pequeñas diferencias de diseño.

La función principal de los diques permeables es reducir la velocidad del flujo, aumentando el tiempo de permanencia del agua en la cuenca; mientras que las llamadas presas de arena además retienen el sedimento, formando un almacén artificial o reservorio aguas arriba de la presa.

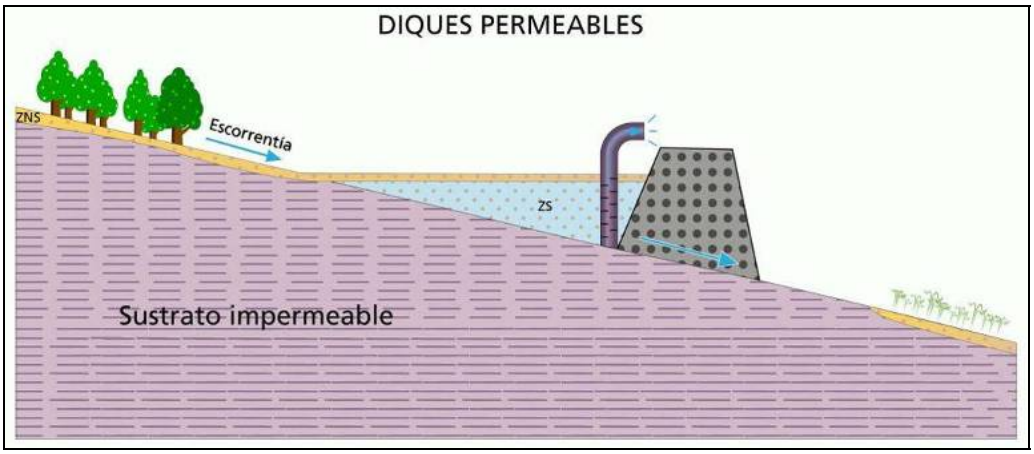


Figura 2-37. Esquema de un dispositivo de recarga artificial, tipo diques de permeables/presas de arena.

DIQUES PERMEABLES

Los diques permeables son estructuras que se instalan transversalmente a la dirección de flujo del cauce y retienen parte del caudal, aumentando significativamente la infiltración natural.

A diferencia de las represas, que se disponen en los márgenes y no ocupan la totalidad del cauce, los diques permeables bloquean el cauce natural del río desde un extremo hasta el otro. Estos diques retienen el flujo “en el tiempo”, ya que permiten el paso de un cierto caudal a través de ellos. Para ello se construyen con materiales permeables, como gravas y bloques.

Los diques además de reducir la velocidad del agua y aumentar la infiltración natural, retienen parte del sedimento que transporta el río, que generan procesos de colmatación y obstrucción de dicha estructura, reduciendo la efectividad y rendimiento del dispositivo. Para reducir este impacto se requiere tareas de limpieza y mantenimiento.

Figuras 2-38 a) y b). a) Fotografía de un dique permeable construido por los agricultores de la zona de La Marina, en el cauce del río Girona, (Alicante); b) Dique permeable que genera una laguna aguas arriba de la presa, (Laguna Neila, Burgos).

PRESAS DE ARENA

Las presas de arena, aunque pueden considerarse como un tipo de dique subsuperficial, realmente no lo son. Son presas construidas en el lecho de cauces de ríos; aguas arriba de éstas se produce la acumulación de sedimentos (natural y antrópica) formando un deposito altamente permeable que puede considerarse como un "acuífero artificial". En él se almacenará parte de la escorrentía superficial de la cuenca.

Estos "acuíferos artificiales", tan empleados en zonas áridas, permiten reducir las perdidas por evaporación, al tiempo que suponen una importante fuente de agua para la población local durante la estación seca. Estos reservorios artificiales pueden llegar a almacenar hasta un 35% de agua respecto al volumen total de las mismas *(Smart Water Harvesting Solutions, 2007).*

Suelen ubicarse en terrenos ondulados o en el valle de pequeños ríos de zonas con clima árido o semiárido, donde las intensas lluvias tienen carácter intermitente y los ríos son efímeros, de alta energía y transportan grandes cargas de sedimentos como consecuencia de su régimen pluviométrico.

La ubicación de la presa debe elegirse cuidadosamente, para asegurar la máxima capacidad de almacenamiento, mínimo impacto y mínimo coste. Son adecuados los valles de ríos con una pendiente baja (entre 1 y 4%).

Los riesgos e impactos aguas abajo, por lo general son bajos en escala e intensidad.

Figuras 2-39 a) y b). Imagen de una presas de arena, en las que puede verse la formación del depósito de materiales aguas arriba del dique. A) Barranco de las Ovejas, Alicante. Tomada de J. Nicolás; b) Presa de arena en África. Foto por cortesía de Sander de Haas.

En general las **presas subsuperficiales** suelen utilizarse en terrenos de baja pendiente, mientras que las presas de arena suelen emplearse para recargar zonas de mayor inclinación.

Es preferible que el muro de la presa se construya progresivamente, en función del material que aporten las sucesivas avenidas, acumulando el material más grueso en el lecho y permitiendo el desbordamiento del agua con los materiales más finos (Tredoux y Murray, 1998). El dispositivo presenta efectividades más altas en entornos de tipo granítico, cuarcítico, areniscoso, etc., cuya meteorización da lugar, en general, a sedimentos de tamaño grueso idóneos para la formación de un acuífero artificial aguas arriba de la presa.

Las **presas de arena** deben construirse sobre un afloramiento rocoso o una capa impermeable, con objeto de minimizar las pérdidas por filtración en la base de la cuenca. La presa debe estar construida con materiales permeables para permitir la infiltración del agua ladera abajo, donde pueden cultivarse diversos tipos de plantas. Aunque estas presas requieren de mano de obra especializada para su construcción, son más resistentes y su vida útil es mayor.

La captación del agua almacenada se realiza mediante pozos excavados o mediante bombas sobre el acuífero artificial creado detrás de la presa. El agua que se obtiene suelen ser de buena calidad, ya que las arenas que forman el acuífero filtran gran parte de los sólidos en suspensión presentes en el agua de escorrentía.

Las principales ventajas de estos dispositivos son que reducen significativamente las perdidas por evaporación, mejoran la calidad del agua y disminuyen las posibilidades de producirse enfermedades, al minimizar la exposición superficial del agua a los

agentes externos, además de que resultan baratos frente a otras alternativas y tienen una larga vida útil.

Su ubicación requiere estudios de detalle llevados a cabo por personal especializado. Además precisan un mantenimiento y revisiones periódicas después de cada episodio de fuertes lluvias.

ALGUNOS CRITERIOS Y EJEMPLOS CONSTRUCTIVOS PARA DIQUES Y REPRESAS

A continuación se adjunta un resumen de dos proyectos de obra "tipo" para la ejecución de diques de laminación de avenidas y recarga artificial simultánea en Huesca y Tenerife. En estos se consideran varias tipologías diferentes.

DIQUES EN EL BARRANCO DE LANA MAYOR

En este ejemplo se va a especificar las condiciones técnicas para la construcción de diques en el barranco de Lana Mayor, afluente del río Gallego, situado en la provincia de Huesca.

Los motivos que originaron la construcción de esta obra fueron:

- Reducción de la cubierta vegetal de la zona que está condicionada por la metereología, los pastos y el relieve de la cuenca.
- Erosión.
- Grandes avenidas por falta de regulación hídrica.

Por lo tanto se decidió efectuar una obra de hidrotecnia con objeto de solucionar los problemas mencionados. A pesar de que la gestión de la recarga no está en los motivos por los que se ha procedido a una gestión hídrica del barranco, este ejemplo es altamente ilustrativo en cuanto a las especificaciones técnicas requeridas para este tipo de obra.

En concreto, en el proyecto se desarrolla la construcción de 14 diques de gravedad, de mampostería hidráulica, de planta recta, con paramento aguas abajo inclinado y uno de ellos con troneras; y un dique, también de gravedad, de hormigón armado, de planta recta, con paramento aguas arriba y aguas abajo verticales.

Para proceder a la construcción de los diques hay que evaluar qué zonas dentro del área estudiada son más favorables para albergar y construir este tipo de obra. Es importante obtener el máximo volumen de vaso con el mínimo volumen de obra posible. También hay que estudiar el tipo de terreno, para así conocer que tipo de cimentación es necesaria, tanto en los estribos como en el fondo del barranco. Otro factor de gran importancia es la accesibilidad a la zona de obra, puesto que un acceso complicado puede encarecer en gran medida el presupuesto de una obra.

En concreto en este ejemplo, de los quince diques, el emplazamiento de cuatro de ellos se sitúan en el cauce principal de Lana Mayor, mientras que los once restantes, se encuentran en varias barranqueras afluentes por la margen izquierda del cauce

principal y dos barrancos cercanos que recorren la zona superior de la cuenca de actuación.

A continuación se van analizar cada uno de los tipos de diques presentes en esta obra:

Diques de mampostería hidráulica

Estos diques tienen planta recta y son de gravedad. La anchura de coronación varía entre 0,5 a 2,5 m según los requerimientos de la zona de construcción.

Poseen unos vertederos trapezoidales con taludes 1/1, que son capaces de evacuar el caudal calculado para un periodo de retorno de 50 años.

En cuanto a la cimentación requerida, se ha procedido a una excavación hasta la afloración rocosa para evitar problemas de tubificación. La zapata suele tener una profundidad de entre 0,7 a 1,5 m., según el alzado de los propios diques.

Para evitar el aumento de la presión hidrostática en los diques, éstos disponen de 2 a 4 filas, en una colocación al tresbolillo, de mechinales con un diámetro de 200 mm y con una inclinación del 3% cada uno de ellos. La separación entre mechinales oscila entre 1 y 1,5 m.

Las alas de los diques están empotradas con una profundidad mínima de 1 m, y están escalonadas de manera que se ajusten lo más perfectamente al terreno.

Dique de troneras de mampostería hidráulica

Es dique de gravedad de planta recta, con de un paramento aguas abajo inclinado y un espesor de cota de coronación de 3 m.

Consta de un vertedero trapezoidal con taludes 1/1, de longitud media de 11,25 m y una altura de 3 m. Sus dimensiones han sido realizadas para evacuar un caudal calculado de 180,38 m^3/s para un periodo de retorno de 100 años.

En este caso la zapata alcanza una profundidad de 1,5 m. La puntera es de 0,5 m mientras que el talón es de 1 m.

Los mechinales están situados a una altura desde la zapata de 4 m. Consisten en una fila de 3 unidades con una dimensión geométrica compuesta por un cuadrado de 0,5 m lado y un semicírculo sobre él de 0,25 m de radio. Al igual que en el caso anterior, los tres mechinales tienen una inclinación de 3% aunque la separación entre mechinales es de 2 m.

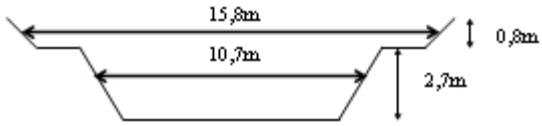
Las troneras estás situadas a 6,7 m de la zapata. Su objetivo es la laminación de los caudales punta de avenida. Se diseñaron dos filas de troneras con distancia horizontal y vertical entre ejes de troneras de 4,10 y 6,70 m respectivamente. Este diseño con troneras permite una evacuación de un caudal excesivo además de garantizar que discurra un caudal mínimo por el cauce.

Por último, las alas del dique están empotradas en las laderas del barranco con una profundidad de 1 m y, al igual que en los anteriores, este dique está escalonado para adaptarse a la geometría del terreno circundante.

Dique selectivo de hormigón armado

Este dique tiene como objetivo la detención de los materiales de mayor tamaño. El material utilizado para la cimentación y construcción del dique es el hormigón armado HA-25/B/40/IIa, con resistencia característica de 25 N/mm^2. Para los perfiles metálicos que constituyen el emparrillado central se recurre a 13 perfiles de acero laminado HEB 320 de 5 m de altura, separados 50 cm entre sí y con una profundidad de anclaje de 0,95 m.

El vertedero del que dispone el dique es de tipo compuesto con forma trapezoidal. Tiene una altura de 3,5 m. Consta de una primera cubeta de 10,7 x 2,7 m con una capacidad de desagüe de 146,97 m^3/s, que coincide con el caudal punta para un periodo de retorno de 50 años. La segunda cubeta es de 15,8 x 0,8 m^2 y permite el paso de 31,4 m^3/s, es decir, del caudal restante hasta alcanzar el valor del caudal punta para un periodo de retorno de 100 años (esquema siguiente).



Tras haber explicado brevemente los tipos de diques del proyecto del barranco Lana Mayor, es importante mencionar algunos elementos necesarios para el buen funcionamiento de los diques:

Elementos de disipación de energía

Son estructuras cuya misión es reducir la energía proveniente de la lámina de agua, para así evitar la erosión del cauce aguas abajo. Hay diques que no precisan este tipo de medidas, al estar cimentados en rocas como pizarras o grauvacas. Sin embargo, en este caso, fue necesario realizar un zampeado en varios de los diques, puesto que estaban situados en depósitos morrénicos.

El zampeado consiste en piedra con mortero. Alcanza una profundidad de 1 m, disponiendo en el extremo inferior de una zarpa de 2 m de altura.

En algunos diques también se ha procedido a utilizar un encachado a base de escollera de grandes bolos con una longitud de 2-3 m, para así aumentar la protección del cauce contra la erosión.

Dispositivos para la protección de márgenes

En este proyecto se da el caso que varios diques están situados sobre materiales morrénicos. Por esto, se ha considerado necesario realizar una protección longitudinal

de escollera a base de piedra y mortero, para evitar que la acción del agua produzca erosión en las laderas.

DIQUES EN BARRANCO DE CHALFRERA, TENERIFE.

Los diques están situados en los municipios de La Guancha, San Juan de Rambla, Los Realejos y La Orotava, Tenerife. Esta zona sufrió un incendio que ha causado una disminución de la presencia vegetal en la zona y, por lo tanto, una menor retención de agua, favoreciendo así los fenómenos de avenidas. Para solucionar esta problemática se acometió la construcción de seis diques de gaviones y tres diques de mampostería hidráulica.

Diques de mampostería

Son obras de planta recta con paramento aguas abajo inclinado. Cada uno de los diques constan de un vertedero con forma trapezoidal con inclinación 1/1, cuyas dimensiones permiten evacuar un caudal correspondiente a un periodo de retorno de 100 años.

La cimentación de los diques consiste en zapatas con puntera y talón que alcanzan profundidades de entre 0,5 a 1 m según la zona dónde se sitúe el propio dique.

En el cuerpo de los diques están una serie de filas al tresbolillo de mechinales. Son de PVC y sus diámetros son de 110 mm. Su misión consiste en reducir la presión hidrostática, permitir el paso de los finos y favorecer el desagüe en momentos de grandes avenidas.

Los diques se encuentran empotrados entre 0,5 a 1,5 m, según la naturaleza del material, roca o mezcla de tierra y piedras.

En cada uno de los diques se han tomado medidas para evitar fenómenos indeseados.

En el dique D-1 (nomenclatura del propio proyecto), se ha colocado un encachado de 5 m de longitud y una solera corta con bordillo triangular para evitar la socavación. El material utilizado ha sido piedra tomada con mortero de $\Phi < 60$ cm.

En el caso del dique D-11, se ha realizado de un colchón amortiguador de 6 m y con las mismas características en cuanto al material que el encachado del dique D-1. Además, se ha realizado un contradique con paramento inclinado aguas abajo, que alcanza una altura de 2 m y posee un vertedero de 0,5 m de altura. Este contradique es de mampostería hidráulica con mechinales de PVC de 110 mm.

Por último, en el dique D-20 se ha efectuado un zampeado inclinado de 5 m de longitud que termina en una zarpa de 1 m de profundidad.

Diques de gaviones

Este tipo de estructuras permiten adecuarse a los asientos diferenciales que pudieran darse en el terreno, eso sí, dentro de un margen.

Estos diques presentan el paramento aguas arriba vertical, mientras que el de aguas abajo está escalonado. Cada escalón tiene una altura de 1 m y una anchura de 0,5 m. Cada uno de ellos consta de un vertedero rectangular, cuyas dimensiones permiten evacuar un caudal correspondiente a un periodo de retorno de 100 años.

En cuanto a la cimentación, se procedió a realizar zapatas con profundidades entre 1 y 2,5 m según la inclinación del propio terreno. El empotramiento de las alas también varía, de 0.5 m cuando es roca a 1.5 m cuando es una mezcla de piedras y tierra.

Según el número de *Froude* calculado para cada uno de los diques, se deben tomar diferentes medidas para evitar la socavación o tubificación.

En el caso que $2,5<F_1<4,5$, se ha realizado un encachado de 5 m de longitud con una solera corta con bordillo triangular. En las laderas no rocosas, se han colocado muros cajeros de gaviones de un 1 m de altura y 0,5 m de altura de cimentación.

Cuando se está en la situación $F_1>4,5$, lo recomendable fue utilizar un colchón amortiguador, aunque también en este caso un encachado de 5 m de longitud, con solera corta con bordillo triangular para proteger en mayor medida a los diques. Para proteger las laderas se ha utilizado escollera de diámetro entre 40 y 60 cm, tomada con mortero.

Para realizar los encachados necesarios se ha utilizado piedra de Φ < 60 cm con mortero.

8- Serpenteos *y levees*

Otro tipo de dispositivos de AR que conllevan actuaciones y modificaciones en el lecho del cauce son los serpenteos, también llamados diques en “T” y en “L” (debido a la forma que tienen) y *levees*. Se instalan en los ríos para reducir la velocidad del agua y favorecer la recarga natural.

Los serpenteos se disponen a ambos lados del canal, con objeto de reproducir el movimiento natural de los ríos meandriformes. Cuanto más sinuoso sea el cauce del río, menor será su velocidad y mayor la infiltración. Los serpenteos, al reducir la velocidad de la corriente, causan un aumento de la anchura del canal y evitan que el río seccione los meandros, manteniendo su sección mojada, y con ello, la infiltración.

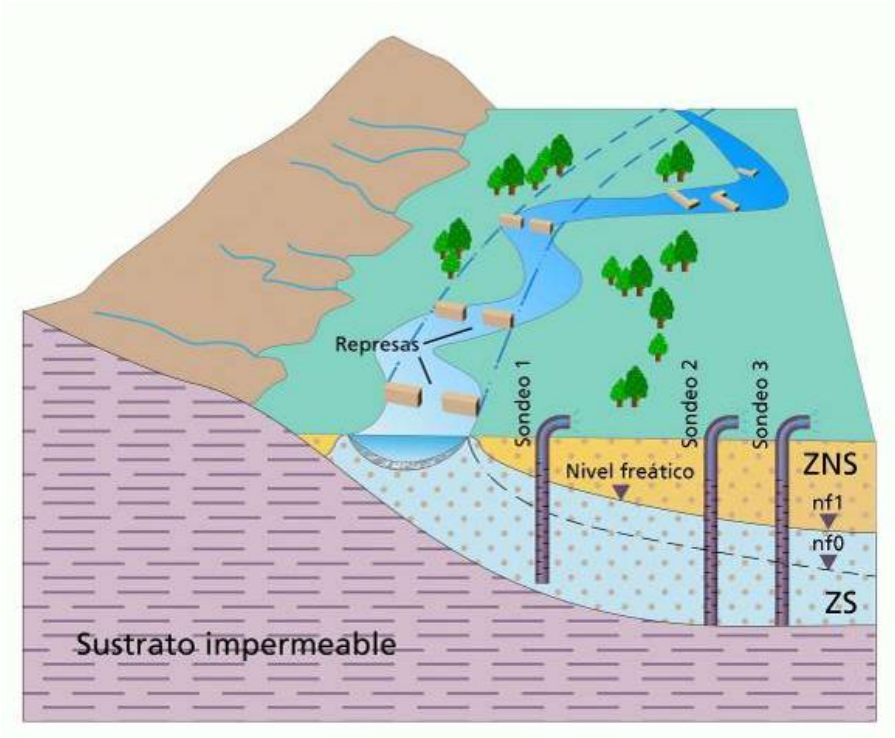


Figura 2-40. Esquema de un dispositivo de recarga artificial mediante serpenteos.

Los diques o serpenteos se instalan en el lecho del río mediante maquinaria tipo excavadora, transversalmente a la dirección de flujo. La cota de coronación del dique apenas supera el nivel medio de la lámina de agua, para evitar inundaciones durante las tormentas.

Según su alzado se distinguen dos tipos de serpenteos, diques en T y en L. Ambos se disponen de manera transversal al margen del río, con la sección de menor longitud perpendicular al río y la de mayor paralela al margen del canal (figuras 2-41).

Figuras 2-41 a) y b). Imágenes de satélite de los dispositivos de AR, mediante serpenteos en el río Santa Ana en Anaheim, California (EEUU) (2008). Fotos por cortesía de A. Hutchinson.

Los diques con forma de T dividen el canal en tres secciones, formándose corredores que permiten el paso del agua con limos y otros sólidos en suspensión, lo que reduce parcialmente los procesos de colmatación.

Sin embargo, estas estructuras favorecen la acumulación de sedimento en las zonas donde la energía se reduce por la presencia del dique, las cuales tienden a colmatarse lentamente. Esto da lugar durante a la formación de corredores en algunas partes del canal del río en los meses de estiaje.

La instalación de estos dispositivos requiere la realización de estudios topográficos e hidrológicos previos, para confirmar que la topografía es totalmente plana y verificar que existe un flujo continuo de agua hacia las partes mas bajas. Así mismo, deberá realizarse un mantenimiento exhaustivo que corrija las posibles modificaciones que tengan lugar en el lecho del río.

Figuras 2-42 a) y b). Diferentes vistas de las actuaciones MAR en el río Santa Ana, en Anaheim, junio de 2006. Fotos por cortesía de A. Hutchinson.

En Anaheim, California, se esta llevando a cabo un importante proyecto de recarga artificial mediante serpenteos en el río Santa Ana, (EEUU). En este río se combinan los dos tipos de diques en T y en L, para reducir la velocidad del canal e impedir que abandone sus antiguos meandros, aumentando el perímetro mojado y la tasa de infiltración natural.

EJEMPLO DE SERPENTEOS EN EL CAUCE. EL CASO DEL RÍO SANTA ANA, ORANGE COUNTY, CALIFORNIA, (EEUU)

En el Condado de Orange (California, EEUU), la necesidad de realizar una gestión del agua sostenible es una prioridad, debido a que se encuentra en una planicie costera semiárida en dónde la lluvia suele ser menor de 500 mm al año. Por ello, en 1933 se formó el Orange County Water District (OCWD), que lleva a cabo esta función. Desde entonces, esta organización ha realizado varias actuaciones relacionadas con la recarga artificial de acuíferos y ampliado a grandes zancadas el estado del arte de los serpenteos y diques fluviales.

Una de las medidas llevada a cabo ha sido la construcción de unos diques de arena, con la misión es expandir el agua por todo el ancho del cauce del río, y así aumentar la tasa de infiltración en el acuífero. La utilización de estos diques favorece que área de infiltración no se vea reducida.

En este condado alternan dos tipos de dispositivos MAR según el periodo estacional.

En los meses de verano construyen unos diques de arena paralelos a la dirección de corriente del río. Eligieron este tipo de diseños porque el buen clima que ofrece la época estival evita que haya grandes tormentas que destruyan los diques. Además permite a los trabajadores secar sectores del río para controlar la proliferación de insectos (mosquitos, etc.).

Como el río Santa Ana tiene una anchura de 300 Ft (91.44 m), el OCWD construye dos diques que dividen el río en tres corredores (runners) con una separación de 100 Ft (30.48 m). De esta manera aseguran la cobertura total del cauce por parte del agua, además de facilitar el transporte de las partículas más finas río abajo. Sin embargo, la construcción de estos diques requiere un esfuerzo importante, debido a la necesidad de nivelar bien el río para que el agua circule por todo su lecho.

Por otro lado, en los meses de invierno el OCWD utiliza unos diques con forma de “T” y “L”. La construcción de estos diques es fácil y rápida. Suelen tener una altura entre 1-3 Ft (30.48-91.44 cm). Tanto la altura como el espaciado entre los diques depende de la pendiente del sector del río dónde se estén construyendo.

Los diques deben disponer de una altura mayor que la cota alta de las aguas, para así reducir su velocidad. El problema de este tipo de diseño es que generan zonas tranquilas, que favorecen la sedimentación, y se producen procesos de colmatación que reducen las tasas de infiltración. En este sentido, los diques paralelos al cauce utilizados en verano son más efectivos. Sin embargo, si el flujo de agua superase a los diques, es previsible que éstos colapsen, facilitando así la circulación de las aguas hacia el océano.

Figura 2-43. Diques con forma de T y L en el río Santa Ana. Foto cortesía de A. Hutchinson.

Para evitar esto, el OCWD invirtió en unas presas inflables de 2.1 m de altura que se instalaron a lo largo de 97.5 m del río Santa Ana. Estos diques son capaces de retener el flujo de agua, para posteriormente desviarlo a los dispositivos de recarga artificial.

Es importante destacar que estas presas no precisan de pilares y que son infladas a través de una tubería de aire (aunque también se puede utilizar agua). El tiempo de inflado ronda los 30 minutos, por lo que su actuación es muy rápida. En el caso de que el nivel de agua se acercase a la parte superior de estos diques y se diera el riesgo de que lo sobrepasase, los diques automáticamente se desinflan en 45 minutos.

9- Escarificación del lecho del río

La escarificación del lecho del río forma parte de las técnicas de modificación del lecho del cauce, y consiste en una alteración del lecho del río para aumentar la infiltración natural y recargar el acuífero subyacente.

Para que tenga lugar la recarga artificial es necesario que dicho acuífero sea superficial y libre, además de cumplir unas características hidrogeológicas necesarias, como son una capacidad de almacenamiento y transmisividad altas.

Figura 2-44. Esquema de la escarificación del lecho del río.

El agua que circula por el río contiene partículas en suspensión, las cuáles se depositan sobre el fondo del lecho permeable, quedando retenidas entre los huecos existentes entre las gravas y arenas (colmatación o *clogging*) y reduciendo la porosidad, permeabilidad, y por ende, la tasa de infiltración de agua al acuífero.

Estas operaciones de escarificado del lecho del río se están realizando desde el año 1950 en el acuífero del Valle Bajo del río Llobregat (acuífero libre) en una zona donde las gravas que forman dicho acuífero están en contacto directo con el río.

Figura 2-45. El icono representa el dispositivo de recarga mediante escarificado del lecho del río.

Desde ese año, se vienen repitiendo las operaciones de escarificado, en el término municipal de Pallejá, lo cual ha conseguido mantener las tasas de recarga artificial del acuífero.

La escarificación tiene los mismos efectos sobre el lecho de forma artificial que las crecidas de forma natural. Durante las crecidas, la velocidad del agua aumenta y el material que se ha decantado sobre el fondo es arrastrado, limpiando el lecho de sedimentos y favoreciendo la infiltración. Como este fenómeno natural ocurre de manera esporádica, es preciso escarificar para eliminar los finos depositados.

Estas operaciones de escarificado se realizan mediante unos *ripper* montados en una excavadora de cadenas, que removiliza las gravas y arenas del fondo del cauce, poniendo en suspensión los materiales mas finos para que sean arrastrados por la corriente. Para que esta técnica sea efectiva, la velocidad a la que avanza la excavadora debe ser menor que la velocidad de la corriente para evitar la decantación de los finos en las zonas ya escarificadas, además de realizarse siempre en el sentido de la corriente.

La efectividad de esta técnica es cuestionada por algunos técnicos; además cuenta con detractores que ven inconvenientes desde un punto de vista medioambiental.

EJEMPLOS DE ESCARIFICACIÓN DE LECHOS DE RÍOS

Escarificación en el Condado de Orange (EEUU)

En el condado de Orange (California, EEUU) se llevan a cabo estudios y experiencias de la limpieza del fondo del río Santa Ana desde la década de los 90.

En 1993, el Orange County Water District (OCWD) utilizó un pequeño prototipo de limpieza, llamado *Basin Cleaning Device*, (BCD) para eliminar la costra generada por efectos de la colmatación. El vehículo era arrastrado mediante cables en el lago Anaheim (Balsa de infiltración).

Los resultados de este experimento fueron satisfactorios y contribuyeron al desarrollo de los prototipos Basin Cleaning Vehicles -2 (BCV-2), con capacidad de sumergirse bajo el agua y dotados de un GPS incorporado. Este vehículo disponía de una capucha patentada con una barrena rotatoria que rompía la capa colmatada en el lecho de la balsa y ponía los sedimentos finos en suspensión para su eliminación por bombeo.

Posteriormente, en el año 2001, se ensayó el BCV-3, que utilizaba una cabeza de corte rotatoria que era capaz de romper la dura costra de limo, y capturaba la arena y el limo dentro de una cámara. En ella la arena era separada hidráulicamente y devuelta al fondo del lago. Todo este dispositivo estaba instalado en un chasis con orugas que facilitaban su desplazamiento durante todo el proceso de la escarificación, permitiendo actuar hasta una profundidad de 6 m.

Cuatro vehículos de este modelo fueron utilizados en diferentes zonas. En tres de ellas, los resultados obtenidos no fueron satisfactorios, debido a la incapacidad de mantener en suspensión las partículas sólidas y a los daños que los fragmentos de rocas generaban en los vehículos. En la cuarta zona (Miller Basin) los resultados fueron aceptables, puesto que en esta área los efectos de colmatación eran menores y el vehículo pudo cumplir con sus funciones.

Como estos vehículos fueron incapaces de eliminar la costra colmatante superficial, cuyo espesor suele estar entre 0,3 y 1,3 cm, el OCWD alquiló un dispositivo para la limpieza de las playas o "beachcleaner", conocido como *Cherrington Model 500 Beachcleaner*. Este era capaz de limpiar amplias zonas, con un paso de banda de 2 m y a profundidades máximas de 15 cm.

Es interesante resaltar que esta máquina no ejerce una presión considerable en el terreno, lo que favorece una menor compactación del suelo y apenas influye negativamente en la tasa de infiltración.

Esta unidad consiguió eliminar la costra de colmatación, reduciendo la cantidad de arena eliminada en comparación con los vehículos anteriormente mencionados. Este es un factor muy importante, porque la arena es el principal componente para una recarga artificial efectiva del acuífero. Por todo esto, la OCDW compró una unidad para escarificar zonas menores a 0,02 km^2.

Figura 2-46. Aspecto del prototipo BCV-3 desarrollado por la OCDW. Foto por cortesía de A. Hutchinson.

De todas formas, la OCDW sigue investigando en este aspecto para conseguir aumentar la tasa de infiltración y continuar mejorando la recarga artificial que están realizando.

Escarificación en el río Llobregat, Barcelona

Esta medida se lleva aplicando desde los años 50 para poder limpiar el fondo del río y reducir los efectos generados por la colmatación. Para llevarla a cabo hay que seguir unas premisas (algunas ya mencionadas anteriormente), además de que el río debe cumplir ciertas condiciones:

- El escarificado debe realizarse en el sentido de la corriente.
- La velocidad del vehículo que realiza el escarificado debe ser menor a la velocidad del flujo de agua.
- El caudal del río tiene que estar entre un rango de entre 10 y 35 m^3/s.

- La turbidez del agua tiene que ser menor a 100 NTU.
- El contenido en amonio debe ser menor a 1 mg/l.
- El contenido en cloruros debe ser menor a 350 mg/l.

La maquinaria utilizada consiste en un tractor con una pala que moviliza las gravas y un ripper que permite labrar el lecho del río.

Figura 2-47. Operación de escarificado en el lecho del río Llobregat (Barcelona) para favorecer que el agua circulante por el cauce recargue al acuífero. Fotografía por cortesía de Armenter, 2006.

10- Diques subsuperficiales/subterráneos

En regiones con climas semiáridos la construcción de pequeñas presas superficiales causa en muchas ocasiones grandes pérdidas por evaporación. La construcción de presas subsuperficiales se presenta como una alternativa sólida para reducir este impacto, siempre y cuando se cumplan los requisitos necesarios para su instalación.

Figura 2-48. Esquema de un dispositivo de recarga artificial mediante la instalación de diques sub-superficiales.

Los diques subsuperficiales permiten almacenar recursos hídricos en regiones donde la construcción de presas superficiales es geológicamente inviable.

Para la instalación de un dique subsuperficial es imprescindible la existencia de un acuífero libre próximo a la superficie, debajo del cual exista un nivel impermeable que impida las perdidas del agua de recarga artificial.

Figura 2-49. Presa subsuperficial en África. Foto por cortesía de Sander de Haas.

No es recomendable la ubicación de estas presas en suelos o terrenos con alto contenido en sales, ya que, aunque existen técnicas para reducir la salinidad del agua, es caro y precisa personal cualificado para el mantenimiento de las instalaciones, encareciendo los costes de la obra. En los casos en que existan este tipo de problemas, pueden llevarse a cabo secados periódicos o el mantenimiento de los niveles de agua muy por debajo de la superficie (Foster 2004).

Los diques subsuperficiales están indicados en terrenos cuyo gradiente topográfico es bajo mientras que en zonas con mayor pendiente es aconsejable la instalación de presas de arena. La presa debe estar construida por materiales impermeables para limitar el flujo subsuperficial de agua.

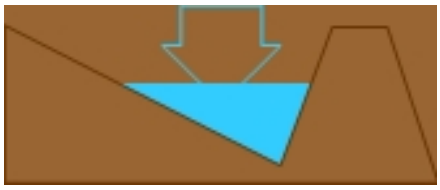


Figura 2-50. El icono representa el dispositivo de recarga mediante diques subsuperficiales, diseñado para el desarrollo de mapas temáticos.

Los principales problemas que pueden presentarse en la construcción de este tipo de presas o diques, son principalmente errores debidos a la falta de conocimientos sobre las propiedades y características hidrogeológicas de la cuenca y de la zona en concreto.

Algunos de los errores más frecuentes, pueden ser:

- Errores en la elección de la ubicación que ocasionan un potencial de almacenamiento insuficiente.
- Insuficiente profundidad para alcanzar un basamento relativamente impermeable.
- Ubicación en un tipo de suelo con muy baja capacidad de infiltración.
- Ubicación en un tipo de suelo que podría ocasionar salinización severa del agua subterránea.
- Pozos de extracción de baja capacidad debido a una construcción deficiente.
- Restricciones en la tenencia de la tierra (Foster 2004).

11- Diques perforados

Los diques perforados suelen emplearse en cauces de ríos efímeros, con flujo rápido y con un alto contenido de sólidos en suspensión. En ellos el tiempo de residencia del agua en la cuenca es insuficiente para que se produzca su infiltración y ésta suele perderse por evaporación, como aportes a otros ríos o al mar.

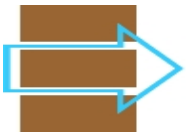


Figura 2-51. Icono diseñado para la representación de dispositivos tipo dique perforado.

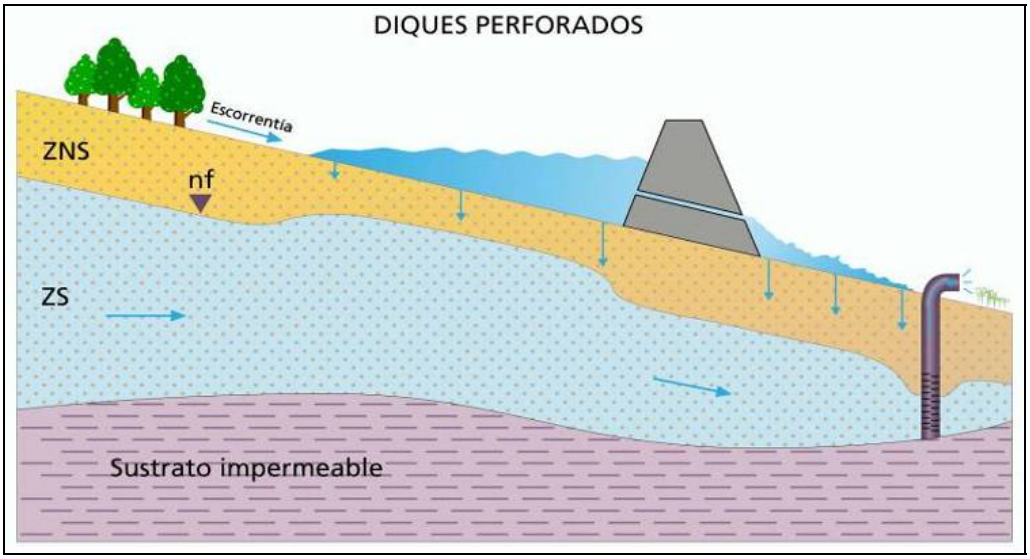


Figura 2-52. Esquema de un dispositivo de gestión de la recarga mediante diques perforados.

Este tipo de diques están formados por una presa construida con materiales impermeables, la cual incluye en su base una o varias tuberías para permitir la salida del agua aguas abajo, siguiendo el cauce del río y favoreciendo la infiltración en una mayor superficie.

Un ejemplo claro de este tipo de diques es la presa de Omdel en Namibia. Esta presa se encuentra construida en el delta del río Omaruru, en el desierto de Namibia, a unos 35 km de la costa. Fue construida en 1993 con una capacidad de hasta 40 Mm^3. Aguas abajo de la presa se construyó una serie de balsas en los márgenes del río que aumentan la sección del canal y con ello la infiltración.

Figuras 2-53 a) a d). a) Dique perforado situado en Santa Cruz de la Zarza, Toledo; b) Dique perforado en el Llevant, Mallorca. Fotos b) tomada de A. Martínez (MARM); c) y d) dique perforado para laminación de avenidas y recarga artificial en Dels Ports, Tarragona, que permite además la presencia de una fuente en su parte central.

El embalse actúa como una trampa de sedimentos, después el agua fluye a través de las tuberías situadas en la base de la presa y discurre a lo largo del cauce y las balsas construidas con material aluvial del lecho del río. La presa retiene los excedentes hídricos del río Omaruru durante la época de inundaciones, recargando así el acuífero, que abastece a varias ciudades costeras.

Figura 2-54 a) y b). Balsas de infiltración en la cuenca del río Omaruru (Namibia); b) Vista aérea de la presa de Omdel. Fotos: a) Tomada de Tredoux (IAH, 2002); b) Tomada de Albrechts, 1994.

Algunas aportaciones al estado del arte emanadas de este proyecto en materia de recarga artificial son (Tredoux, 2002):

- Se consigue conservar mucha más agua mediante las técnicas de recarga artificial de la que se almacenaría por infiltración natural durante la época de inundaciones.
- Un gran volumen de agua que se perdía por evaporación o por escorrentía al mar, es recuperada y almacenada en el subsuelo, donde las pérdidas por evaporación son mínimas, en zonas donde las temperaturas son extremadamente altas en verano.
- Para favorecer la infiltración, las balsas deben someterse de forma regular a un escarificado del lecho, reduciendo así la colmatación.

POZOS (12-18)

Los sistemas de recarga artificial mediante pozos, sondeos, etc., suelen emplearse en terrenos donde el uso de sistemas superficiales es inadecuado, ya sea por disponer de poco espacio o por tratarse de acuíferos poco transmisivos o que presenten alternancia de niveles permeables e impermeables. Algunas de las técnicas de recarga artificial en profundidad incluidas en este grupo genérico son los drenes y galerías, pozos, minisondeos y sondeos de inyección, ASR/ASTR (Aquifer Storage & Recorvery / AS Transfer R) y la inyección a través de simas y dolinas.

12- Qanats (galerías subterráneas)

El sistema llamado qanats (que significa "excavar"), fue inventado en Irán hace miles de años. Debido a su sencillez y eficacia, se extendió con facilidad hacia otras regiones de Oriente Medio, China, en todo el Mediterráneo, etc.

La expansión del Islam inició una importante difusión de la tecnología de los qanats. Las primeras invasiones árabes propagaron esta tecnología hacia el oeste a través de África del Norte, Chipre, Sicilia, España y las Islas Canarias. En España, por ejemplo, los árabes construyeron un sistema de qanats en Crevillente (muy probablemente para uso agrícola) y otros en Madrid y Córdoba para el abastecimiento de agua urbana. Otro ejemplo de la importante difusión que tubo este tipo de tecnología en la antigüedad fue su llegada al Nuevo Mundo, todavía se pueden encontrar qanats en el oeste de México, en las regiones de Atacama (Perú) así como en Nazca y Pica (Chile).

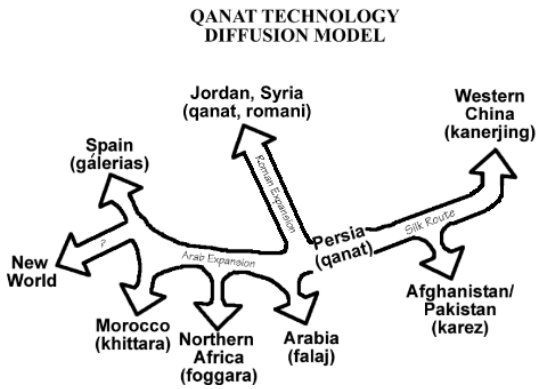


Figura 2-55. Posibles rutas de difusión de la tecnología de recarga artificial mediante qanats. Tomado de www.waterhistory.org/histories/qanats/.

Este sistema de recarga artificial tiene como principal función conducir el agua desde los acuíferos situados en las partes más altas hasta los piedemonte y fondos del valle mediante gravedad. No siempre el agua que conducen los qanats tiene que proceder de estas zonas topográficamente elevadas, también existen qanats que explotan acuífero aluviales o incluso acuíferos situados a nivel del mar.

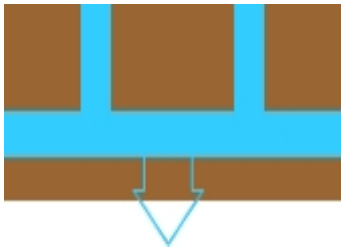


Figura 2-56. Icono diseñado para la representación de dispositivos tipo qanat o galería subterránea.

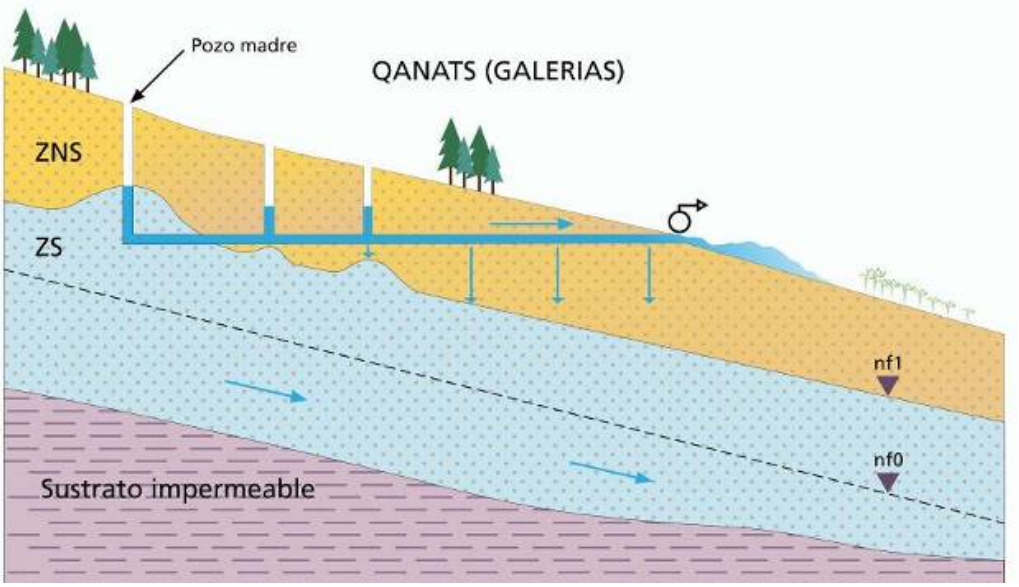
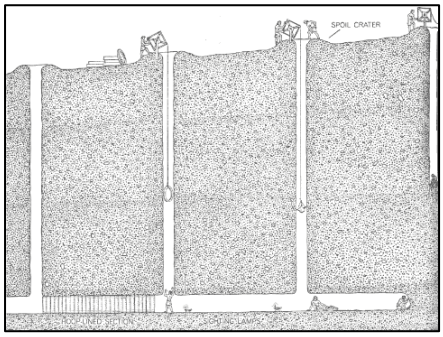


Figura 2-57. Esquema de un dispositivo de qanats.

El agua proveniente de las partes más altas era conducida a las tomas de distribución de las aldeas situadas en el valle, desde las cuales era acarreada o conducida a los campos de riego. Este sistema permitió la creación de auténticos vergeles en zonas áridas o semiáridas, incluso en épocas de intensa sequía, durantes las cuales la disponibilidad de aguas superficiales era casi nula.

El sistema de qanats consta de un túnel principal que discurre con una leve inclinación desde los acuíferos hasta una zona topográficamente más baja. A lo largo del túnel principal se excavan una serie de pozos verticales, cuyas funciones eran proporcionar ventilación, permitir el acceso para las reparaciones y la eliminación del material excavado. Los túneles eran excavados a mano y su diámetro era el suficiente para permitir el paso de la persona que realizaba la excavación.



Figuras 2-58 a) y b). a) Ejemplo de un molinete utilizado para la extracción del material de desecho desde el túnel principal hasta la superficie, (fotografía de un molinete en el museo de Turpan, China), b) Esquema de un qanats durante su construcción. Tomadas de: a) www.waterhistory.org/histories/qanats; b) H.E. Wulff, 2004.

Los qanats se dividen en diferentes secciones como se muestra a continuación y en la siguiente figura:

1. Sección del túnel donde tiene lugar la infiltración.
2. Parte del túnel donde se lleva a cabo el transporte.
3. Canal de salida.
4. Pozos verticales de ventilación.
5. Pequeño estanque de almacenamiento.
6. Zona de riego.
7. Acuífero superficial formado principalmente de arena y grava.
8. Capa de suelo.
9. Nivel de las aguas subterráneas.

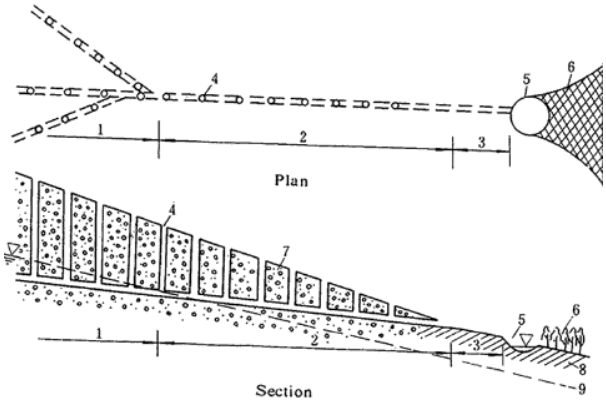


Figura 2-59. Esquema general de un qanat. Tomado de www.waterhistory.org/histories/qanats/

Este tipo de dispositivo presenta tres ventajas en especial:

- El hecho de que los canales de distribución sean subterráneos reduce drásticamente las perdidas por evaporación en regiones donde las temperaturas en verano pueden llegar a ser realmente elevadas.
- Ya que el movimiento del agua dentro de los canales se realiza únicamente por gravedad, no existe la necesidad de bombas o pozos para la extracción de agua.
- El volumen de agua que proporcionan estos dispositivos está controlado por el nivel freático de las aguas subterráneas. El caudal de los qanats varía directamente con la proporción de agua disponible en los acuíferos, lo cuál hace de los qanats sean un sistema sostenible a largo plazo.

Este último punto es su principal desventaja respecto a otros dispositivos actuales, ya que presenta una importante auto-limitación en cuanto al rendimiento y funcionalidad.

Figura 2-60. Vista aérea las ruinas aéreas de Persépolis (Irán), dónde se observan, alineados, los pozos de ventilación de los qanats. Tomado de Wulff, 2004.

Los qanats suelen ser excavados en la ladera de montañas o colinas, cuando existe una formación permeable como puede ser un abanico aluvial en la base o piedemonte de éstas. Previamente a la construcción de los qanats, debe realizarse un estudio para localizar el terreno más apropiado para la excavación de los túneles.

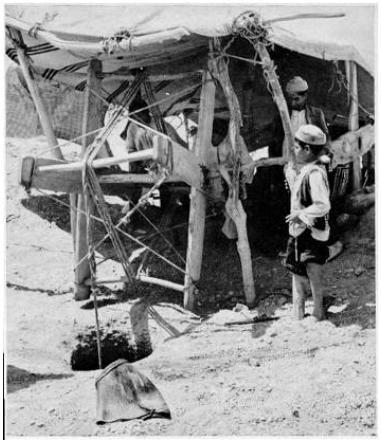
Las técnicas de construcción utilizadas en el siglo 10 d C son básicamente las mismas que se utilizan hoy.

La construcción comienza mediante la excavación de un pozo de ventilación en la salida del futuro qanat sobre el aluvial. El pozo se excava hasta encontrar un acuífero potencial, entonces se calcula la conductividad hidráulica del acuífero. Si el acuífero es apropiado para la construcción de un qanat, comienza la excavación del túnel principal hacia las partes altas de la montaña, manteniendo siempre una leve inclinación que permita el movimiento del agua por gravedad, sin que tengan lugar procesos de lavado en la parte inferior del túnel.

A medida que la construcción del túnel principal avanza, se van excavando los pozos de ventilación, para la extracción del material excavado. Para una mayor seguridad, debe reforzarse la boca de salida o emboquille del qanat con piedras u otro material, para evitar posibles daños ocasionados por la erosión.

En las zonas donde el material no esta consolidado o es inestable, pueden tener lugar colapsos y hundimientos en el túnel (chimeneas), con los peligros que eso conlleva para el personal de la obra. En estas zonas se suele reforzar el túnel mediante aros de arcilla cocida o azulejos.

La presencia de gases o zonas con déficit de oxígeno son altamente peligrosas, así como también lo es la inundación del túnel por una entrada repentina de agua, especialmente en las zonas de cabecera.



Figuras 2-61 a) y b). a) Personal encargado de la construcción de un qanats utilizando anillos de arcilla cocida para reforzar las zonas inestables del túnel; b) Ejemplo de un molinete utilizado para la extracción del material de desecho. Tomado de H.E. Wulff, 2004.

Los pozos de ventilación están protegidos en la parte superior mediante un cráter fabricado con el material obtenido de la construcción del pozo, y en ocasiones se cierran totalmente para evitar la entrada de aguas de escorrentía.

En función de la profundidad y las características del acuífero puede variar la longitud del qanat, desde una milla (1,61 km.) hasta incluso 18 km. de largo, (sur de Irán). El rendimiento de estos dispositivos también varía ampliamente, por ejemplo en la llanura de Varamin, al sureste de Teherán, existen un sistema de 200 qanats, cuyo rendimiento llega hasta los 270 l/s de caudal en los de mayor tamaño, mientras que otros sólo aportan 0,9 l/s.

Con el fin de garantizar un flujo continuo desde el qanat a largo plazo y una rentabilidad adecuada a la inversión de tiempo y dinero que supone la construcción de un dispositivo de este tipo, es necesario que el acuífero capturado se recargue estacionalmente de manera natural. Por lo general son acuíferos superficiales, en zonas donde el material superficial es altamente permeable y permite la recarga del acuífero situado bajo él. También deben mantenerse de forma continua las tareas de limpieza de sedimentos, estabilización de techos y muros así como demás reparaciones.

13- Pozos abiertos de infiltración

Este tipo de dispositivo de recarga artificial es utilizado cuando existen capas superficiales de baja permeabilidad sobre acuíferos más idóneos para la técnica MAR. También, dado su carácter puntual, cuando la disponibilidad de terreno en superficie es baja y no es posible construir dispositivos de dispersión.

El dispositivo consiste en uno o varios pozos de "gran diámetro" y de poca profundidad, aproximadamente de 5 a 15 m (Bouwer, 1996). Tanto las paredes laterales como el fondo del pozo deben ser lo mas estrechas posibles para favorecer al máximo la infiltración. Es aconsejable rellenar el pozo con gravillas y arenas gruesas para favorecer la infiltración y reducir los costes de mantenimiento en caso de obstrucción. El agua de recarga artificial se inyecta o se vierte desde la superficie, siendo lo más apropiado, que la parte superior del pozo este cubierta y protegida de la luz solar, animales y personas.

La reutilización de estructuras ya existentes, como son pozos abandonados o minas ya en desuso para recargar el acuífero, abarata significativamente los costes de la obra

Figura 2-62. Icono diseñado para la representación de dispositivos tipo pozo de infiltración.

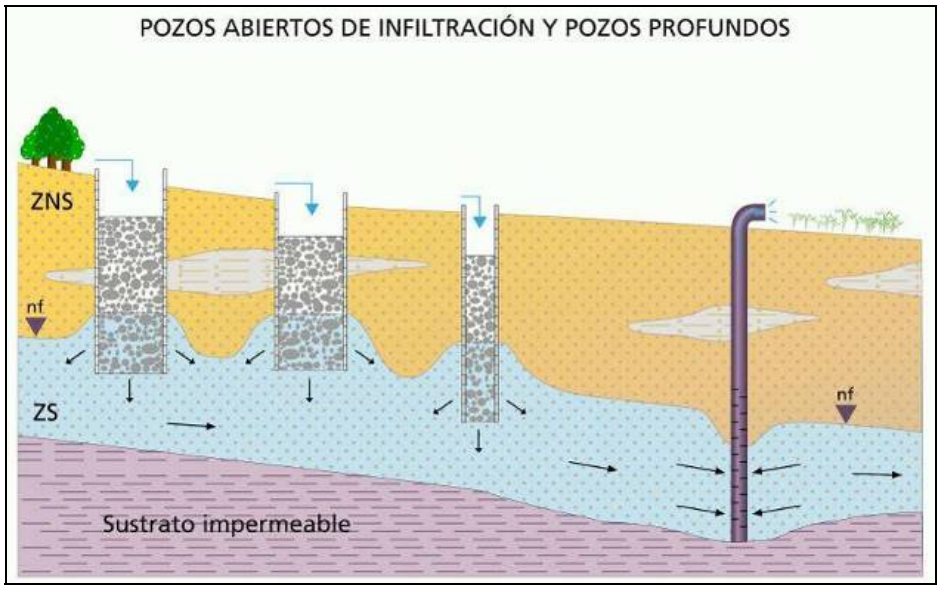


Figura 2-63. Esquema de un dispositivo de pozos abiertos de infiltración y pozos profundos.

Este tipo de dispositivo, aunque es más efectivo en algunos casos que las técnicas de dispersión, puede sufrir problemas de contaminación en función de la calidad del agua de recarga artificial, ya que no tiene lugar el filtrado natural de los sólidos en suspensión, bacterias, etc. que sí ocurre en las técnicas de dispersión superficial, salvo que se intercalen dispositivos específicos, como filtros o decantadores, lo que resulta una opción más que recomendable.

En general los fosos y trincheras presentan altos costes de construcción en relación a los volúmenes de agua que consiguen recargar, por lo que su uso se suele limitar a los casos idóneos o a estructuras ya disponibles en forma de canteras abandonadas, pozos de grava, etc.

Figuras 2-64 a) y b). a) Pozo abierto de infiltración de gran diámetro en Graz, Austria; b) Pozo abierto de infiltración en Arizona, EEUU.

Un aspecto muy importante a tener en cuenta es la calidad de las aguas de recarga artificial, principalmente la proporción de sólidos en suspensión, especialmente si el agua de recarga artificial es de origen pluvial, para evitar la colmatación que reducirá la capacidad de infiltración del pozo.

Del mismo modo, el agua de recarga artificial puede originar problemas de contaminación por presencia de patógenos, nitrógenos, plaguicidas, etc., lo cual hace imprescindible la realización de un estricto mantenimiento y control de la calidad de las aguas subterráneas.

Otra posible fuente de agua de recarga artificial para este tipo de dispositivos es la reutilización de aguas regeneradas, teniendo siempre en cuenta las posibles modificaciones que esta fuente de agua pueda originar en las aguas locales.

Estos pozos de infiltración, no deben emplearse en lugares donde los pozos de abastecimiento se encuentren a menos de 10 m de profundidad o donde el subsuelo esté compuesto por formaciones calcáreas o rocas fracturadas, a fin de evitar la contaminación de las aguas subterráneas.

En definitiva, el pretratamiento de las aguas resulta quizás la medida más efectiva para llevar a cabo la técnica MAR en este tipo de dispositivos con su máxima operatividad.

14- Pozos profundos y minisondeos

Este tipo de instalaciones suelen emplearse en terrenos donde el uso de sistemas superficiales es inadecuado, ya sea por disponer de poco espacio o por tratarse de acuíferos poco transmisivos o con alternancia de niveles permeables e impermeables.

Figura 2-65. Icono diseñado para la representación de dispositivos tipo pozo profundo o minisondeo.

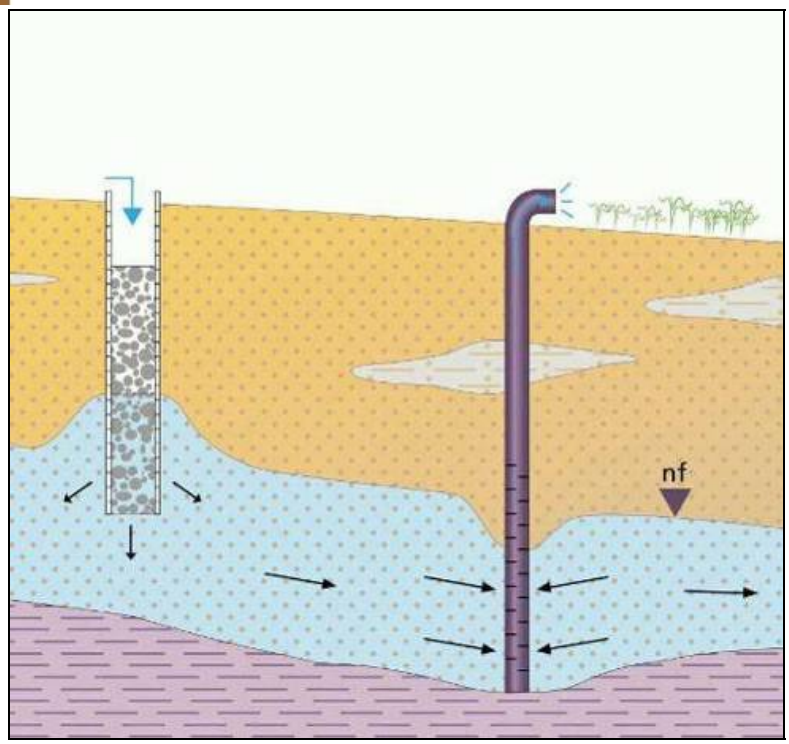


Figura 2-66. Esquema de un dispositivo de pozos profundos.

La principal diferencia con los “pozos abiertos de infiltración” es la profundidad de los mismos (figura 2-66), que depende de la permeabilidad y sobre todo del espesor de los estratos de baja permeabilidad que recubren la “formación objetivo” que se pretende recargar.

El resto de las características en cuanto a revestimiento, relleno, mantenimiento, calidad de las aguas de recarga, costes, etc., son muy similares a las descritas anteriormente, salvo las diferencias debidas a que los diseños constructivos suelen tener un diámetro inferior, con lo que difieren los materiales, sistemas de construcción, etc.

Figuras 2-67 a) y b). Pozo profundo de infiltración que emplea como fuente aguas fluviales del Canal del Guadiana, Ciudad Real.

En cuanto a los minisondeos, frecuentes en acuíferos detríticos de grano fino libres o semiconfinados y superficiales, solo cabe decir que suelen recibir ese nombre los sondeos menores de 30 m. Presentan unas características muy similares a las de los sondeos, por lo que se trata de un tipo de dispositivo que “cabalga” entre ambas tipologías.

EJEMPLOS DE DISEÑOS CONSTRUCTIVOS DE POZOS DE RECARGA ARTIFICIAL. BATERÍA DEL CANAL DEL GUADIANA, CIUDAD REAL.

Los pozos de recarga artificial que hay en la cuenca del río Guadiana se realizaron en distintas etapas bien a percusión o bien mediante rotopercusión (figura 2-68).

Los pozos captan el agua directamente del río a través de una tubería de hormigón de 0,80 m de diámetro que está protegido por una escollera. Posteriormente el agua pasa por una compuerta al decantador, y es filtrada durante su paso por una arqueta arenero, para que el agua sea finalmente introducida en el pozo (figura 2-69).

Figura 2-68. Construcción de un pozo en enero de 2010. Canal del Guadiana, Ciudad Real. Foto por cortesía de D. Moraga, 2010.

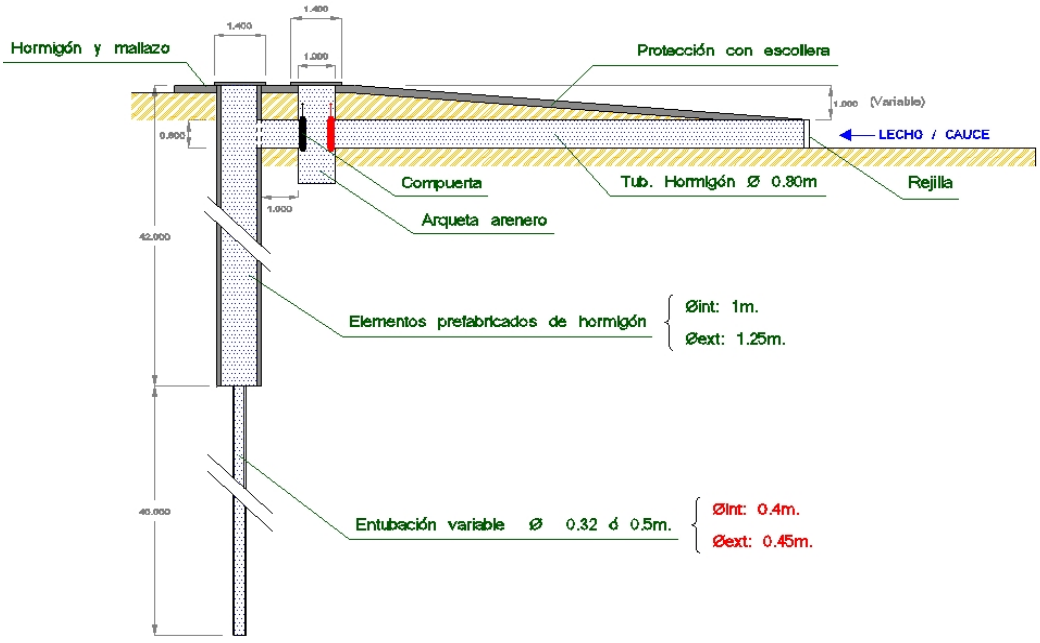


Figura 2-69. Ejemplo de un esquema constructivo de un pozo para recarga artificial (Por cortesía de la CHG, 2010).

Figura 2-70. Construcción de los elementos auxiliares de un pozo profundo de MAR. Foto por cortesía de D. Moraga, 2010.

El pozo consta de unos elementos prefabricados de hormigón con unos diámetros exteriores de 1,25 m e interiores de 1 m. A continuación se encuentra la entubación con un diámetro variable entre 0,32 a 0,5 m en la tercera etapa, aunque la entubación de los pozos anteriores se realizó con un diámetro exterior de 0,45 m y uno interior de 0,4 m. La profundidad varía de 40 a 90 m. En la figura 2-69 se muestra un esquema constructivo de un pozo para MAR.

15- Sondeos

A diferencia de los pozos abiertos o pozos profundos, en los sondeos el agua suele ser inyectada en el acuífero mediante bombas u otro mecanismo de impulsión, mientras que en los pozos, ésta se infiltra hasta las capas más permeables por gravedad, independientemente de que cuente con una bomba de impulsión.

Figura 2-71. Icono diseñado para la representación de dispositivos tipo sondeo.

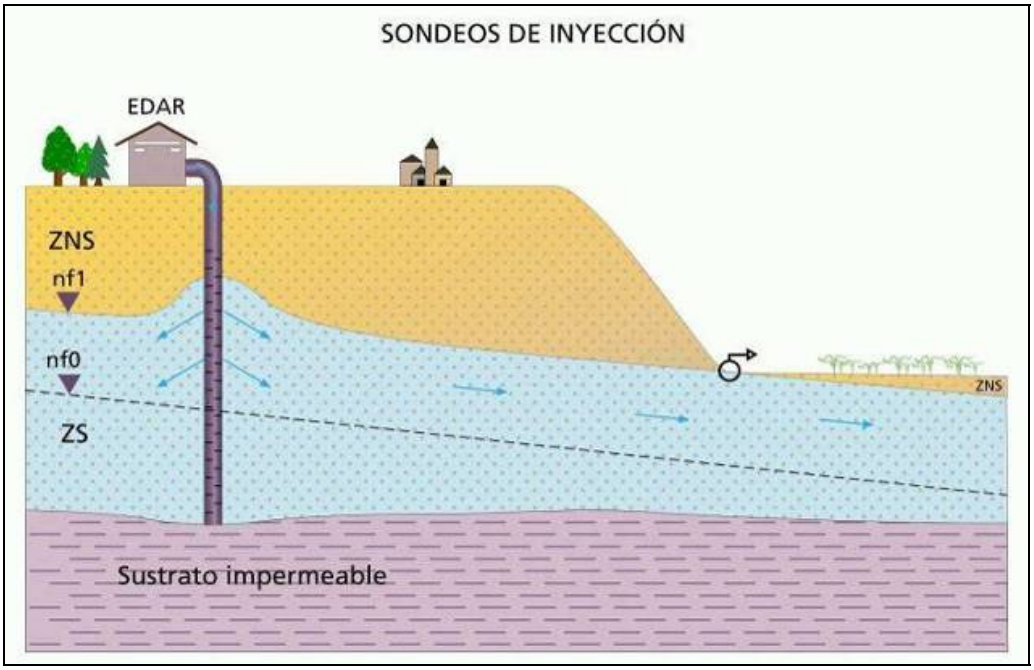


Figura 2-72. Esquema de un sondeo de inyección.

Se trata de un diseño más apropiado para aquellos casos en los que los parámetros hidrogeológicos del acuífero a recargar no son tan elevados en cuanto a transmisividad y coeficiente de almacenamiento, y requieren la introducción de agua a presión para alcanzar tasas de recarga viables y rentables.

En el caso de los sondeos de inyección, el agua es inyectada en el acuífero y ésta fluye de manera natural, siguiendo el gradiente hidráulico de la zona, hasta ser recuperada

con otros sondeos o bien a través de surgencias y manantiales. También pueden estar destinadas para incrementar la lámina de lagunas o ríos, etc.

Figuras 2-73. Sondeo de inyección y extracción, Cornellá, Barcelona.

Los sondeos de inyección pueden utilizarse como una técnica de recarga artificial y de recuperación de medios naturales, aprovechando excedentes hídricos existentes en otros puntos de la cuenca, como puede ser la recuperación de humedales o zonas pantanosas, secadas por una extracción y bombeos excesivos.

EJEMPLOS DE DISEÑOS CONSTRUCTIVOS DE SONDEOS Y DISPOSITIVOS MAR TIPO ASR.

Sondeos de la barrera hidráulica contra la intrusión marina en Los Ángeles (EEUU)

La excesiva demanda de agua subterránea generada durante varias décadas en el condado de Los Ángeles ha provocado procesos de intrusión marina en los acuíferos continentales. Como consecuencia, ya en los años 40 se empezó a estudiar la recarga artificial como medida reductora de la intrusión marina. Actualmente existen tres barreras hidráulicas que disminuyen la contaminación marina en esta zona:

- The West Coast Basin Barrier Project: Consiste en una batería de 153 pozos que van desde el norte de Palos verdes Hills hasta el Aeropuerto Internacional de Los Ángeles, es decir, una distancia de 9 millas (14.5 km) estos pozos alcanzan unas profundidades de 1000 Ft (305 m). El agua de la recarga es introducida en los acuíferos de Silverado y San Pedro (Lower). Los diseños de los pozos pueden ser múltiples o no, dependiendo de si penetran en uno o en ambos acuíferos.

- The Alamitos Barrier Project (ABP): Esta batería consta de 43 pozos y fue construida en 1964 por Los Angeles County y Orange County. Esta barrera está situada 2 millas (3.22 km) tierra adentro desde la desembocadura del río Gabriel.

- The Dominguez Gap Barrier Project (DGBP): Este proyecto comenzó a funcionar en 1971 y consiste en 41 pozos de inyección dispuestos desde F Street hasta E Street a lo largo del canal Domínguez. Están situados a lo largo de 12 millas (19,31 km). En este caso, los pozos fueron perforados con 20" (508 mm) de diámetro, mientras que la entubación presenta un diámetro de 14" (355,6 mm). El espacio anular entre la perforación y la entubación consta de un empaque de gravas a modo de filtro. La separación mínima entre pozos es de 20 Ft (6,10 m).

Sondeos de la barrera hidráulica del Llobregat (Barcelona)

La batería de sondeos de la primera fase de la barrera hidráulica contra la intrusión marina en el Llobregat constaba de cinco sondeos distantes entre sí unos 300 m. Tienen un diámetro de perforación de 610 mm.

Están entubados con acero inoxidable de 350 mm, alcanzan hasta 70 m de profundidad y los tramos filtrantes son de tubería troquelada de tipo puentecillo de 6 m de longitud en la zona del acuífero principal, alternando con tramos de tubería ciega de longitud similar.

La infraestructura principal de la que constan estos sondeos son caudalímetros, válvulas reguladoras de inyección automática, sensor de nivel y puertos para muestreo. Todos los sondeos disponen de cabezal estanco.

Figura 2-74. Sondeo de la barrera hidráulica en el Llobregat. Octubre de 2007.

El dispositivo ha sido ampliado en fases posteriores.

16- Dolinas, colapsos

La utilización tanto de dolinas como de colapsos naturales para la recarga artificial puede considerarse como otro tipo de dispositivo incluido dentro del grupo genérico de los pozos o sistemas de recarga artificial profunda.

Las dolinas son depresiones cerradas de origen kárstico que concentran el agua de lluvia que circula por la superficie, permitiendo su infiltración hacia las partes más profundas del karst. Suelen estar conectadas en profundidad con un sistema kárstico, que es realmente el que hará las funciones de almacén y de red de distribución del agua de recarga artificial (figura 2-75).

Figura 2-75. Icono propuesto por DINA-MAR para la representación de dispositivos tipo dolina o colapso.

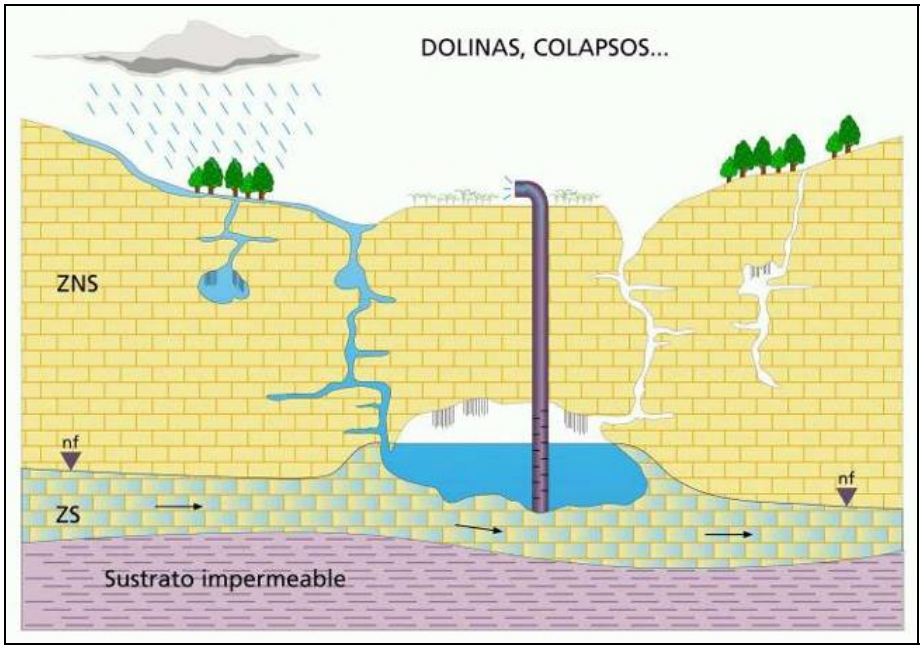


Figura 2-76. Esquema de un sistema de recarga mediante dolinas y colapsos.

Estos acuíferos kársticos deben ser estudiados previamente, para evitar pérdidas del agua de recarga artificial a través de galerías subterráneas y otro tipo de conexiones.

Otro aspecto a tener en consideración es la calidad del agua de recarga artificial, ya que pueden generarse procesos de hiperoxidación, descalcificación, disolución o precipitación al interaccionar el agua con la matriz del acuífero.

Figura 2-77 a) y b). Imagen de una dolina-pozo empleada para recarga artificial en Els Poblets (izquierda) y b) colapso de Pedreguer (derecha) en Alicante.

El agua de recarga artificial es conducida desde la fuente la cual puede tratarse tanto de un río como de un canal o laguna, etc. hasta la dolina o colapso, y es introducida a través de ésta en el acuífero.

En la época de máxima demanda o en situaciones de emergencia, el agua puede ser extraída mediante bombas a través de un sondeo para su utilización o de las propias dolinas.

17/18- ASR/ASTR

Los dispositivos de ASR/ASTR, al igual que el resto de los dispositivos pertenecientes al grupo de pozos, son adecuados en zonas donde existen estratos de baja permeabilidad sobre el acuífero, cuando la disponibilidad de terreno impide la utilización de técnicas de dispersión superficial.

Al introducir directamente el agua en el acuífero la calidad del agua de recarga artificial, requiere una mayor calidad que la empleada en la recarga artificial mediante los métodos de distribución, así como un gasto energético.

Este método de recarga artificial consiste en un único sondeo, el cual es utilizado tanto para la inyección como para la recuperación del agua del recarga artificial (figuras 2-79 a) y b)). En los momentos en los que existe un excedente hídrico en la cuenca, debido a periodos de lluvias o excedentes de producción de depuradoras o desaladoras, que coincide con una demanda de este recurso, el excedente puede ser utilizado para recargar artificialmente el acuífero mediante la inyección. Cuando la demanda de agua aumenta o sobrevienen períodos de sequía o de emergencia, existe un volumen en la reserva del acuífero para hacer frente a esta situación y paliar el impacto sin tener que incrementar la producción de plantas de tratamiento de aguas o la captación de aguas superficiales.

Figura 2-78. Iconos diseñados y propuestos por DINA-MAR para la representación de dispositivos tipo ASR y ASTR.

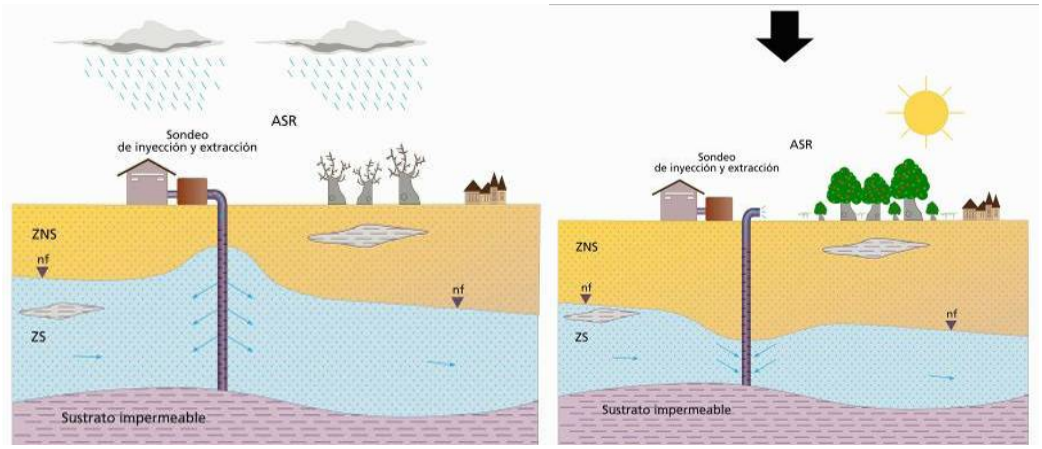


Figura 2-79 a) y b). Esquema de un sistema de recarga artificial tipo ASR, fases de inyección y de recuperación.

El aumento de los sistemas de recarga de tipo ASR en la última década ha estado motivado por la proliferación de desaladoras, plantas potabilizadoras y depuradoras. Estas obtienen su máximo rendimiento cuando funcionan a plena carga en régimen constante durante todo el año. Como la demanda que suelen cubrir tiene una modulación o variación estacional, la utilización de un sistema de regulación con almacenamiento subterráneo permite optimizar la dimensión de la planta, consiguiendo importantes ahorros de escala, ya que la capacidad se adapta a la demanda media y no a la demanda máxima (IGME 2006).

La técnica ASR puede emplearse en diferentes tipos de acuíferos, siendo preferente la utilización de estos dispositivos en aquellos consolidados donde las formaciones geológicas proporcionan un nivel competente y no hacen necesario el empleo de pantallas y empaques de gravas (Dillon y Molloy, 2006). En general es preciso tener en cuenta algunas consideraciones.

Los acuíferos carbonatados pueden compensar satisfactoriamente los efectos de obstrucción, debido a la disolución del carbonato cálcico y a la amplia gama de técnicas de descolmatación química (inyección de algún agente ligeramente ácido, etc.). No obstante pueden producirse problemas debido a la mezcla del agua de recarga artificial con las aguas nativas (Herczeg et al, 2004).

En el caso de acuíferos fracturados (hard rocks), cuya porosidad principal es debida a la fracturación del macizo rocoso, el método ASR se configura como exitoso incluso para obtener bajos caudales (Murray y Tredoux, 2002).

Los acuíferos aluviales y terciarios, constituidos por materiales detríticos gruesos, también son idóneos para el empleo de esta técnica. Debe prestarse especial atención a los problemas de obstrucción que puedan generarse en el pozo o sondeo como consecuencia de la acumulación de materia orgánica y partículas coloidales.

Los acuíferos no consolidados de grano fino presentan más problemas, y requieren que la calidad del agua de inyección sea mayor. El contenido en materia orgánica los sólidos en suspensión deben ser muy escasos para evitar reducciones crónicas del rendimiento del ASR. Los parámetros y estándares de calidad están normalizados y regulados por ley en varios países, como es España (RD 1620/2007).

El método de ASR presenta algunas ventajas respecto a otros sistemas de recarga artificial en superficie:

- La necesidad de terreno es menor que en las técnicas de dispersión superficial. Resulta especialmente apropiado en zonas donde el precio del suelo es muy elevado.
- Las tasas de evaporación son menores, ya que la exposición desagua a la atmósfera es menor.
- Las necesidades hidrogeológicas del acuífero utilizado para la recarga son menores.
- El ciclo de recuperación produce un lavado, al crearse una circulación inversa, lo que reduce en gran medida los procesos de obstrucción.
- Es posible instalarlos en acuíferos multicapas, donde la capacidad de infiltración vertical se ve reducida por la presencia de capas de baja permeabilidad. Se usan

incluso en acuíferos con presencia de niveles poco permeables.

Figuras 2-80 a) y b). a) Imagen de sistemas ASR en Arizona (EEUU); b) ASR en Adelaida, (Australia del Sur).

Algunos de los inconvenientes más comunes en la utilización de este tipo de dispositivos son:

- Debido a la mezcla del agua inyectada con el agua nativa, tiene lugar la formación de una interfase cuya morfología varía en función de las características de las aguas. Esto provoca que no toda el agua inyectada en el acuífero pueda ser recuperada mediante el pozo de ASR.

- El uso de presiones de inyección incorrectas puede alterar la red de fracturas, generando nuevas o ampliando las ya existentes.

- Un volumen de recarga artificial excesivamente alto en el pozo puede dar lugar a la formación de un régimen turbulento, (en el entorno del pozo), lo cual modificaría el rendimiento y movimiento del agua en la zona de recarga artificial.

- Debe realizarse un estudio previo de las características hidrogeológicas de la zona con el fin de evaluar los posibles cambios que se pueden puedan producir debido a la interacción de las aguas de recarga artificial con la matriz del acuífero y las aguas nativas, que con el tiempo y un diseño inapropiado pueden dar lugar a colapsos, fracturación, compactación, fenómenos de disolución, precipitación, hiperoxidación, sinergismos, entrada de aire en el acuífero, efecto *Lisse*, etc.

- El bombeo de agua puede producir variaciones en las presiones a las que están sometidas tanto la matriz del acuífero (especialmente en detríticos de grano fino no consolidados o con escasez de matriz) como las aguas nativas. Cuando se extrae el agua del acuífero, la presión es transferida a la matriz sólida de éste, produciendo su compactación. Cuando cesa el bombeo, el agua migra de nuevo a los poros de la matriz, reduciendo la tensión y provocando la descompresión. Estas modificaciones del volumen de la matriz del acuífero pueden provocar, a lo largo de los diversos ciclos de recarga, la dispersión de la fracción primaria del acuífero, fisuras y fracturas, que motivan variaciones no solo en la porosidad inicial del acuífero, sino también en el flujo subterráneo de agua en las inmediaciones del sistema ASR.

- Un acuífero cuya transmisividad sea demasiado alta, puede provocar el movimiento lateral del agua más allá de la zona de recuperación del pozo de ASR, además de aumentar la zona de mezcla e interacción con las aguas nativas. Por el contrario, un acuífero cuya transmisividad sea demasiado baja, puede generar sobrepresiones en el pozo durante el ciclo de recarga artificial y una reducción excesiva de la presión durante el ciclo de recuperación.

Aunque un determinado volumen del agua inyectada se desplace mas allá de la divisoria hidrogeológica, en la depleción el cono de bombeo puede quedar dividido por la propia divisoria, generando una fracción que no podrá ser recuperada por el mismo ASR, pero sí podrá ser recuperada parcialmente por otros pozos situados aguas abajo.

- En cuanto a la calidad de las aguas, ésta debe ser, en general, mucho mayor que la empleada en las técnicas de superficie, ya que ésta es introducida directamente en el acuífero sin que el suelo y la zona no saturada actúen a modo de filtro. Un método utilizado para mejorar la calidad del agua de recarga artificial es intercalar filtros en la base de los pozos, para reducir la proporción de sólidos en suspensión así como la entrada de contaminantes directamente al acuífero. Puede ser necesario algún pretratamiento químico del agua para prevenir la floculación de hierro, $CaCO_3$, etc., y la cloración u otro tipo de técnica de desinfección (DBPs) para prevenir el crecimiento microbiano.

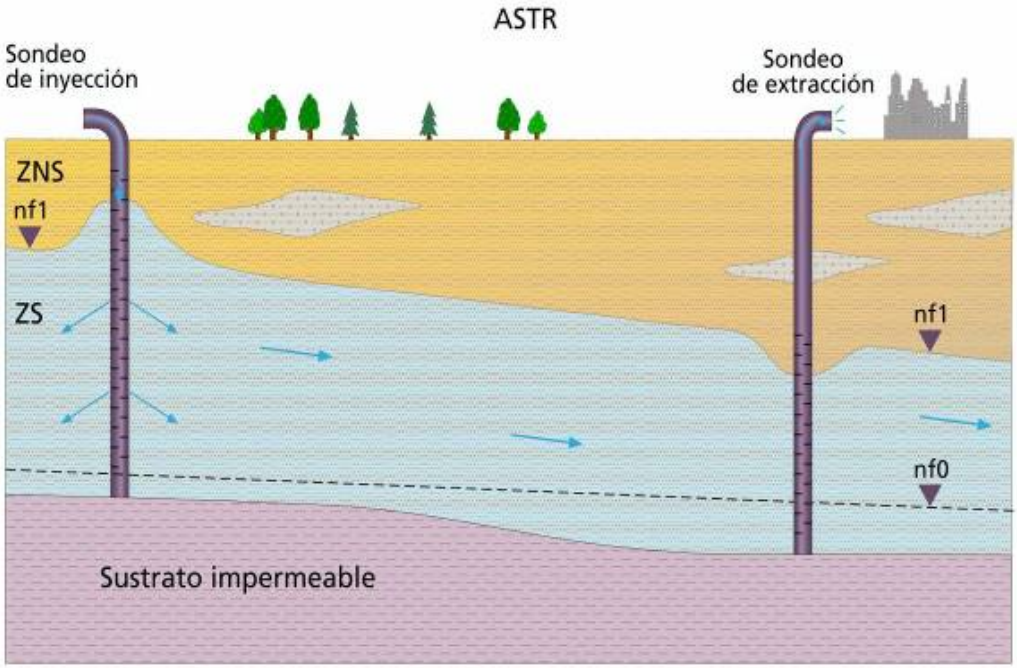
- La obstrucción de los pozos de ASR, debido a la entrada de aire o los efectos de la colmatación, es quizás el problema más importante.

Los procesos de obstrucción se pueden reducir de forma significativa mediante el simple tratamiento mecánico del agua de recarga artificial, permitiendo la sedimentación (decantación) o el filtrado previo, con objeto de disminuir los sólidos en suspensión. Del mismo modo, es preciso instalar una compleja valvulería en el equipamiento, para evitar la caída libre del agua y asegurar que se obtenga una columna continua hasta la superficie mediante desaceleradotes, válvulas antirretorno, válvulas de pié, etc. El diseño apropiado reduce los procesos de obstrucción y colmatación del dispositivo de manera importante.

La principal diferencia de los ASR "*Aquifer Storage Recovery*" o "*Almacenamiento en Acuífero con Recuperación*" con los ASTR, es que en los primeros el agua es inyectada y recuperada a través de un sólo sondeo; sin embargo en los ASTR *"Aquifer Storage Transfer and Recovery"* o "*Almacenamiento en Acuífero, Transferencia y Recuperación*", el agua es inyectada en un sondeo y se recupera a través de otro/s distinto/s, situado/s a una distancia variable, en ocasiones de varios kilómetros (figura 2-81).

En los ASTR, se produce un filtrado inducido del agua de recarga artificial durante su paso a través del acuífero, desde el sondeo de inyección hasta el sondeo de recuperación. Este filtrado variará en función de las características hidrogeológicas del acuífero, como son el tiempo de permanencia, la textura y composición del acuífero, el gradiente hidráulico, etc.

Las necesidades de los ASTR son muy similares, y en algunos casos mayores, de las de los ASR, ya que al no haber, en general, recuperación a través del pozo de inyección, no tienen lugar procesos de lavado.



Figuras 2-81 a) y b). Esquema de un sistema de recarga artificial mediante ASTR y aspecto de un dispositivo ASTR en California.

EJEMPLOS DE DISEÑOS CONSTRUCTIVOS DE SONDEOS Y DISPOSITIVOS MAR TIPO ASR.

ASR

Proyecto Water Campus en Scottsdale (Arizona, EEUU)

La ciudad de Scottsdale está situada en el estado de Arizona, EEUU. Esta zona está caracterizada por un clima desértico, por lo que el abastecimiento y suministro de agua es una de sus principales prioridades, tanto para abastecimiento como para ocio, al tratarse de un núcleo turístico internacional para la práctica del golf.

El 60 % del suministro de agua de la ciudad proviene del Central Arizona Project (CAP), que consiste en una ordenación y uso racional del río Colorado. Otro 20 % del suministro proviene de aguas subterráneas. El resto se obtiene a partir del Salt River Project (SRP) que, al igual que el CAP, regula las aguas superficiales del Salt River (río Salado) y del río Verde.

Sin embargo, la ciudad de Scottsdale ha desarrollado el proyecto *Water Campus*, que consiste en una planta que trata aguas residuales mediante microfiltración y ósmosis inversa. El agua tratada se utiliza para el regadío, aunque en invierno se aprovecha la menor demanda de agua para recargar artificialmente el acuífero a través de sondeos (ASR). Esta planta presenta un nivel tan alto de automatización que solo precisa de 10 trabajadores para su funcionamiento.

Los pozos de inyección tienen diseño telescópico y constan, en principio, de una perforación de 18” (457.2 mm) hasta aproximadamente los 20 Ft (6.09 m). La tubería de revestimiento instalada a modo de emboquille es de acero con bajo contenido en carbono y tiene un diámetro de 12” (304.8 mm). El relleno entre la perforación y la tubería de revestimiento consta de un sellamiento elástico.

A partir de los 20 Ft (6.09 m) hasta el final del pozo, la perforación es de 11” (279.4 mm). Desde los 20 Ft (6.09 m) hasta los 460 Ft (140.21 m), el anular entre la tubería y la perforación está relleno por una lechada de bentonita.

Entre los 460 Ft (140,21 m) hasta los 480 Ft (146,30 m) la lechada vuelve a ser de cemento puro, aunque luego, hasta la profundidad de 580 Ft (176,78 m) se vuelve a utilizar la lechada de bentonita.

La entubación es de PVC roscada de 5" (127 mm) de diámetro. El espacio anular entre la tubería del pozo y el revestimiento es rellenado por una lechada de cemento puro.

Entre los 580 (176,78 m) y los 590 Ft (179,83 m), el relleno del anular consiste en pellets de bentonita.

Entre los 590 Ft (179,83 m) hasta el final de la perforación, a unos 814 Ft (248,11 m), se encuentra la formación objetivo y el espacio anular está relleno con un filtro de grava silícea.

Entre las profundidades de 670 Ft (204.22 m) y 770 Ft (234.69 m), la tubería utilizada no es ciega, sino ranurada de 0,40" de luz (1,02 cm) a 0,80" (2,03 cm) hasta una profundidad de 690 Ft (210.31 m). El final del pozo consiste en una tubería ciega con un tapón de fondo a los 780 Ft (237,74 m).

El nivel freático se encuentra a 503,1 Ft (153,34 m).

Como dato relevante, en el año 2009, esta planta de tratamiento consiguió recargar artificialmente en el acuífero 1.955.106 galones (7400.88 m^3).

Recarga artificial en Adelaida, Australia

La planta de Bolívar está situada a 25 Km al norte del centro de Adelaida (Australia del Sur).

Esta planta, aparte de cumplir con sus funciones de reutilización, también aplica la recarga artificial del acuífero durante los meses de invierno y así evita la sobreexplotación por regadío durante la época estival.

La capacidad de esta planta es de 45.000 m^3/día.

En la zona hay dos acuíferos calizos terciarios separados por una capa de arcilla de 7.5 m de potencia. El acuífero que actualmente se está recargando artificialmente es el más profundo de los dos mencionados y es conocido como la formación Port Willunga.

El dispositivo que se utiliza para efectuar la recarga artificial es el ASR.

La perforación inicial tiene un diámetro de 229 mm.

La entubación realizada en estos pozos es de fibra de polietileno reforzado con fibra de vidrio de 203 mm hasta una profundidad de 103 m.

El anular comprendido entre la entubación y la perforación está sellado con una lechada de cemento-bentonita.

La profundidad restante se ha mantenido como un pozo abierto hasta los 160 m. Los pozos ASR se encuentran a distancias radiales de entre 4 a 75 m con disposición equidistante.

Estos dispositivos de ASR alcanzan profundidades que varían entre 120 y 300 m, según la profundidad del acuífero en la zona.

Figura 2-82. Dispositivos de ASR en Adelaida.

Con esta planta de tratamiento se ha conseguido minimizar los impactos ambientales en la zona, reducir la dependencia del río Murray para el abastecimiento y obtener una gestión sostenible del agua.

EJEMPLO DE UN SISTEMA ASTR. LA MINA COBRE LAS CRUCES, GERENA, SEVILLA

En el inventario de recarga artificial de España (capítulo 1) se analiza con detenimiento el dispositivo ASTR (Sistema de drenaje-reinyección) que hay instalado en la explotación minera de Las Cruces. En este apartado se va analizar las especificaciones constructivas de la batería de sondeos de drenaje e inyección que permiten la explotación minera.

Sistema de drenaje

Está constituido por una batería de sondeos que extraen el agua de la corta y de sus alrededores para permitir la explotación y evitar la contaminación del acuífero, que en principio parece ser el Niebla-Posadas.

En octubre del 2009 había 31 sondeos de drenaje, de los cuales, 26 estaban operativos. En ese momento se preveía construir 28 sondeos periféricos, 3 sondeos de substitución y de 3 a 6 sondeos en la corta.

La construcción de un pozo de extracción de este sistema consiste en una perforación de 500 mm que coincide con el espesor de suelo y raña. Esta zona está provista de una tubería de revestimiento de 350 mm de diámetro y 5 mm de espesor (emboquille).

La tubería del pozo es ciega de acero helicosoldado de 180 mm de diámetro y 5 mm de espesor (en adelante 180/190). Entre la tubería ciega y la perforación se ha instalado grava silícea calibrada y lavada con una granulometría entre 2 y 8 mm (grava 2-8). La tubería ciega alcanza una profundidad aproximada de 130 m, coincidiendo con la cota del muro de las margas azules del Guadalquivir.

A partir de esa profundidad se utiliza tubería filtrante troquelada de acero al carbono de tipo puentecillo de 180/190mm y un 1 mm de luz hasta los 150 m. Este espesor coincide con el acuífero de Niebla-Posadas.

El relleno que se utiliza para el espacio anular externo es grava silícea de 2-4 mm. A partir de esta profundidad y hasta los 152 m, está entubado con tubería ciega y una tapa en el fondo.

La profundidad final media de la perforación es de 159 m.

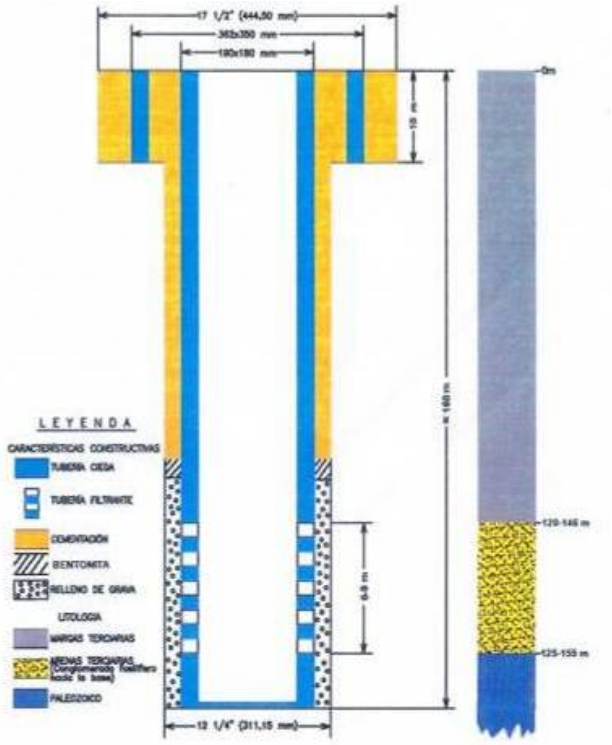


Figura 2-83. Esquema de sondeo tipo de drenaje perimetral. Tomado de CLC, 2009.

Sistema de reinyección

Consiste en el traslado del agua extraída anteriormente a una distancia suficiente para su reinyección en el acuífero y evitar su contaminación.

En octubre de 2009 había 33 sondeos, de los cuales, 18 estaban operativos. Las perspectivas en ese momento era la construcción de otros 8 más.

La construcción de un sondeo de reinyección consiste en una perforación de 470 mm hasta una profundidad de unos 12 m, a modo de emboquille, entubada con tubería ciega de revestimiento de 350/360 mm.

A continuación, la perforación es de 311 mm. Se utiliza tubería ciega hasta los 69 m de profundidad. El anular que hay entre la perforación y la tubería es cementado.

Entre los 65 y los 67 m se utiliza un centrador y un sellamiento elástico (tapón de bentonita). Toda la longitud de la tubería ciega coincide con el espesor de margas que hay en el terreno.

A partir de está profundidad y coincidiendo con el acuífero más productivo, la entubación consta de 18 metros de tubería de ranura continua tipo Jonson. Para finalizar la columna hay un nuevo tramo de tubería ciega y un tapón de fondo a los 89 m de profundidad.

Este tramo cuenta con empaque de grava silícea clasificada natural de 2-4 mm. La columna tipo de estos sondeos se encuentra en la figura 2-84.

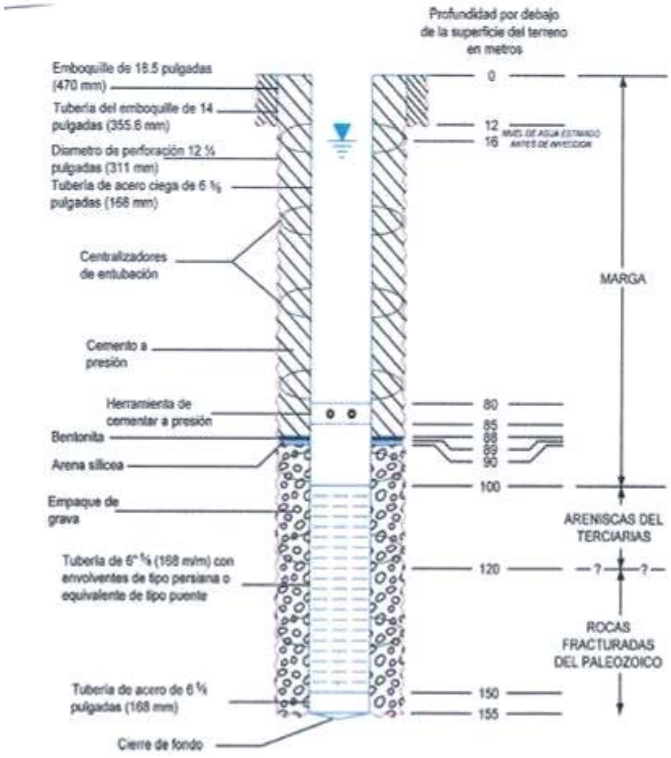


Figura 2-84. Esquema general de un sondeo de reinyección tipo. Tomado de CLC, 2009.

FILTRACIÓN (19-21)

Los dispositivos de filtración son sistemas que utilizan tanto instalaciones artificiales ya existentes como ambientes naturales, con objeto de introducir algunas modificaciones antrópicas que permitan aumentar la tasa de infiltración o recarga natural. Se incluyen en esta tipología los dispositivos de *River Bank Filtration* (RBF), la filtración interdunar y el riego subterráneo.

19- Bancos filtrantes en lechos de ríos (RBF)

Las aguas subterráneas comúnmente están conectadas hidráulicamente a las aguas superficiales (Alley et al., 1999).

Existen tres tipos de conexiones entre las masas de agua superficiales y las aguas subterráneas. Un río ganador o efluente es aquel que recibe aportes de las aguas subterráneas, mientras que uno perdedor o influente es aquel que cede agua a las mismas. Existe un tercer tipo de conexión en la cual el río actúa de las dos formas anteriores como ganador y perdedor en diferentes puntos dependiendo de cambios locales y temporales. Los desconectados se suelen designar “conservativos” en la literatura hidrogeológica.

En aquellos casos en los que el río cede agua al acuífero, el propio aluvión sirve de filtro, depurando en gran medida las aguas fluyentes, casuística que es aprovechada por el hombre para ubicar pozos de extracción y utilizar las aguas filtradas de esta manera (figura 2-86). Si la permeabilidad del suelo y la conductividad hidráulica vertical del acuífero son bajos, el flujo entre las masas de aguas superficiales (ríos, lagunas, embalses, etc.) y el acuífero será mas lenta, y el volumen de recarga y de recuperación será menor, aunque no necesariamente menos importante.

Los pozos situados en las inmediaciones de estas masas de agua superficiales pueden tener un fuerte impacto en el nivel de las aguas superficiales. Las extracciones realizadas en estos pozos próximos al cauce aumentan la infiltración natural por “efecto llamada”, generando un flujo de agua desde el río hasta el acuífero. El fenómeno está acrecentado cuando el lecho y los márgenes de las masas de aguas son altamente permeables y no están revestidos.

Se trata de un sistema ampliamente extendido desde tiempos ancestrales (hay incluso una cita bíblica en el Éxodo), que todavía hoy en día se practican en zonas con dificultades para construir presas, como puede ser el banco del río Nilo en algunas regiones de Sudán.

Figura 2-85. Icono propuesto por DINA-MAR para la representación de dispositivos tipo RBF.

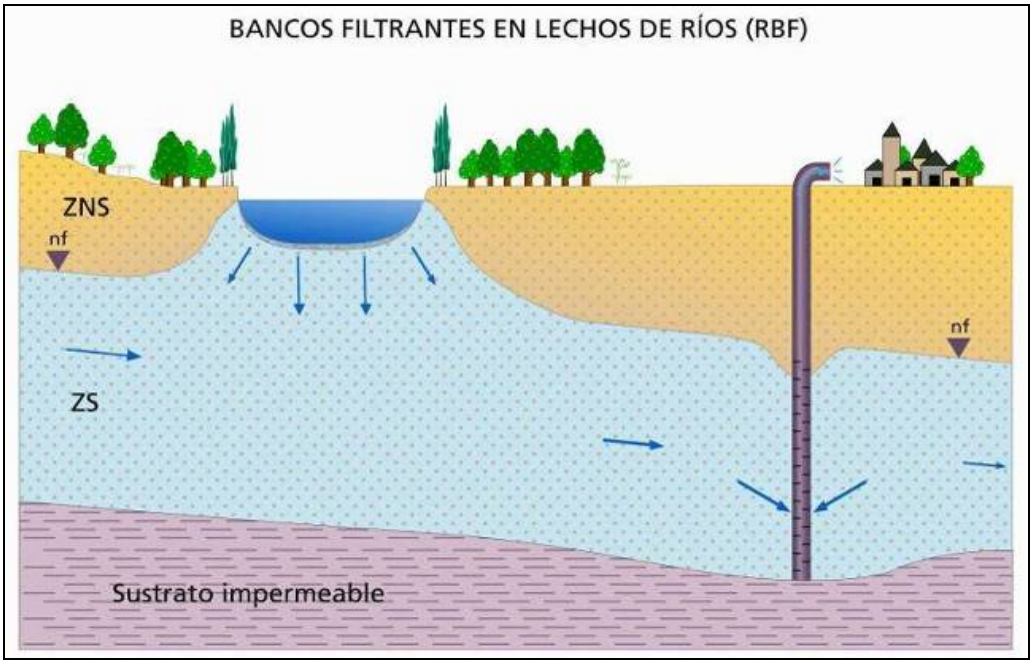


Figura 2-86. Esquema de un sistema de recarga artificial a través de bancos filtrantes en lechos de ríos o RBF.

Los métodos de bancos filtrantes en lechos de ríos (de aquí en adelante, RBF) implican diversas modificaciones que pueden realizarse en un cauce o masa de agua superficial, para aumentar la infiltraron natural que tiene lugar en los márgenes y lecho de río. Esta técnica engloba tanto la instalación de una batería de pozos en el margen del río como la ampliación y modificación de las márgenes de ríos o lagos, la instalación de pozos de filtración en el propio cauce, la implantación de una serie de tuberías de drenaje, etc.

El método de RBF más común suele ser la instalación de una galería o líneas de pozos paralelas en el margen de un cuerpo de agua superficial y a poca distancia del mismo. El bombeo de las perforaciones disminuye el nivel freático adyacente al río o lago, induciendo al agua de la corriente a infiltrarse en el acuífero (Gale, 2005), lo que convierte este tipo de dispositivos en un sistema de gestión de la recarga “puro”.

Los principales factores a tener en cuenta para obtener un máximo rendimiento de estos dispositivos MAR son:

- La disponibilidad de una fuente fiable de agua (principal).
- La calidad del agua de recarga artificial debe ser aceptable.
- Alta permeabilidad de los depósitos del lecho del río o lago.
- Acuífero subyacente superficial y libre.
- Acuífero cuya transmisividad y permeabilidad sean altas.

Figuras 2-87 a) y b). Pozos de infiltración tipo Ranney (detalle de los drenes radiales) y pozo tipo Felhmann (respectivamente) asociados a un RBF en el margen del río Ebro, Tudela, Navarra.

Si la permeabilidad de los depósitos del lecho del río y del acuífero es alta y el acuífero tiene el suficiente espesor, es posible extraer grandes cantidades de agua desde la línea de pozos sin producir impactos negativos en el nivel freático tierra adentro.

Para asegurar una depuración satisfactoria del agua superficial infiltrada en el acuífero, es aconsejable que el tiempo de viaje a través del suelo y zona no saturada sea mayor de entre 30 y 60 días (Huisman & Olsthoorn, 1983). De este modo, la distancia entre la línea de pozos y el cuerpo de agua superficial debe ser suficiente para asegurar este tiempo de tránsito.

Debido a la agitación que sufren las aguas, tanto en ríos como en lagos, éstos suelen tener una cantidad considerable de material en suspensión y aire en disolución. Cuando esta agua se infiltra, los sólidos en suspensión forman una fina capa en el fondo del río o lago, lo que conlleva un mejor filtrado pero también una menor tasa de infiltración. Si la colmatación es excesiva, puede ser necesario el escarificado de la superficie durante los período de aguas bajas u otras opciones de limpieza y mantenimiento.

Los posibles cambios cualitativos temporales de las aguas superficiales pueden influir en los procesos de depuración naturales que tienen lugar en el acuífero en los dispositivos tipo RBF. Por ejemplo, los cambios en la temperatura del agua del río pueden desencadenar reacciones diferentes por cambios de las condiciones termodinámicas en la interacción.

Durante la época de inundaciones, los tiempos de viaje del agua en el acuífero son menores, la calidad del agua empeora notablemente y se ve reducida la efectividad de la purificación natural. Pero incluso durante las inundaciones y en los períodos de estiaje, las barreras de protección tanto técnicas como naturales siguen actuando como un método fiable para la producción de agua potable (Eckert *et al*, 2005).

En Budapest, la capital de Hungría, el abastecimiento de agua potable depende completamente del agua filtrada en las márgenes del río Danubio. La cantidad de agua extraída depende únicamente de la capacidad de infiltración de las márgenes del río, de manera que las extracciones son de un orden de magnitud menor que el volumen de descarga del río.

Una de las principales ventajas que presenta este método respecto a la extracción directa del agua desde la masa superficial, es que el tratamiento posterior para purificar las aguas extraídas es mínimo, lo que hace posible la utilización de esta agua para usos que precisan agua potable de alta calidad, para suministro público y determinados usos industriales, habida cuenta de la ausencia o escasa detección de contaminantes.

Figura 2-88. Infiltración inducida en la margen del río Danubio, Budapest. Foto cortesía de H. Szabó Sándor, 2005 (IAH).

A lo largo de las márgenes del Danubio se encuentran la mayoría de los pozos de extracción. El uso actual es de 0,9 Mm^3/d (75% con fines públicos), y la capacidad potencial futura es de aproximadamente 4,0 Mm3/d, de la cuál un volumen de 300.000 m^3/d es protegido al constituir un recurso hídrico futuro (Simonffy, 2003).

20- Filtración interdunar

La filtración interdunar es otro tipo de dispositivo de AR de filtración, muy similar al RBF, que, además de recargar el acuífero, la filtración más fina mejora la calidad del agua de recarga artificial.

Se trata de un dispositivo típico pero no exclusivo de zonas costeras, proclive para combatir la intrusión marina, ya que aumentan la cantidad y calidad del agua de los acuíferos costeros que recargan de modo artificial en la interfaz tierra-mar (figura 2-90).

Figura 2-89. Icono propuesto por DINA-MAR para la representación de dispositivos tipo filtración interdunar.

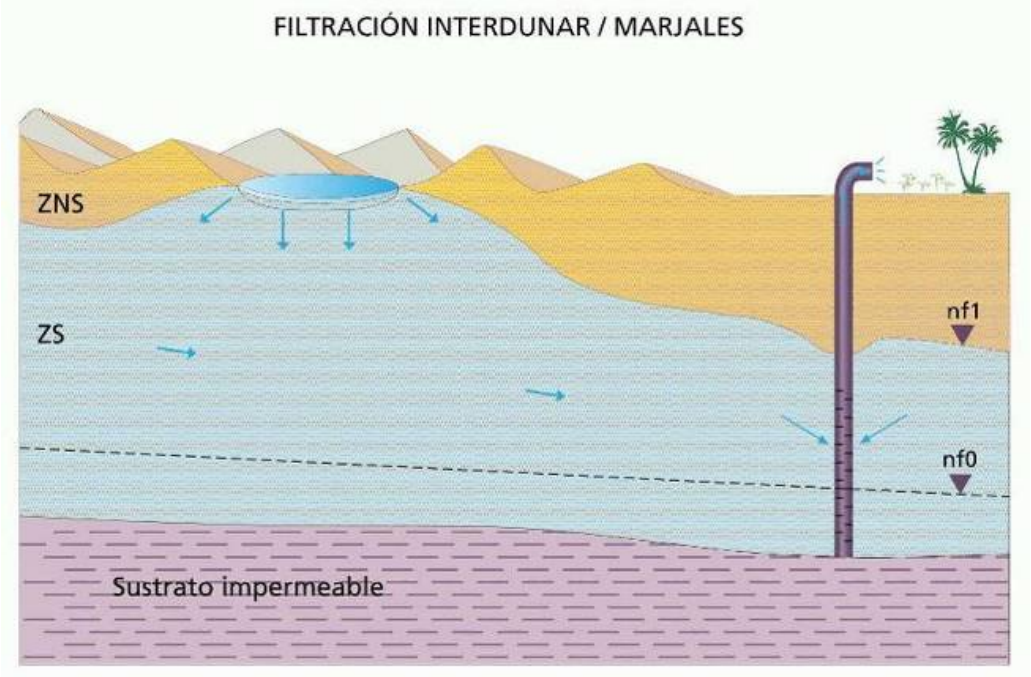


Figura 2-90. Esquema de un sistema de recarga artificial mediante filtración interdunar.

Este tipo de dispositivos han sido muy utilizados en las costas de Holanda, con aguas de origen fluvial.

El agua es bombeada o derivada por gravedad desde un río, canal u otra fuente de agua hasta los marjales o depresiones que existen entre los trenes de dunas. Desde aquí el agua se infiltra por gravedad y se desplaza por el suelo y el acuífero hacia

zonas más bajas. Las dunas actúan como un filtro natural, eliminando los residuos de materia orgánica, nitrógeno, microorganismos patógenos, etc.

Figuras 2-91 a) y b). Filtración interdunar en Ámsterdam, Países Bajos, tomada de AWS, 1998 (IAH); b) Filtración interdunar en el Carracillo, Segovia (sistema dunar interior).

21- Riego subterráneo

El riego subterráneo, a diferencia del riego subsuperficial, consiste en la aplicación de agua en zonas más profundas que éste último. La aplicación del método pretende conseguir, bien la creación de franjas húmedas a la profundidad deseada, bien acuíferos colgados o bien la creación de niveles freáticos artificiales (figura 2-93).

Dadas las características de este método de riego, su aplicación más inmediata parece corresponder a los cultivos leñosos, no obstante, debido a la profundidad radicular de algunos cultivos herbáceos, no se debe descartar a priori ninguna posibilidad (Martínez Tejero, 2008).

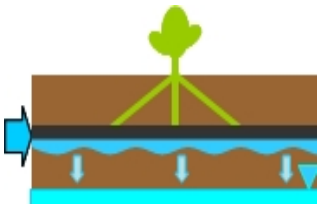


Figura 2-92. Icono propuesto por DINA-MAR para la representación de dispositivos tipo riego subterráneo.

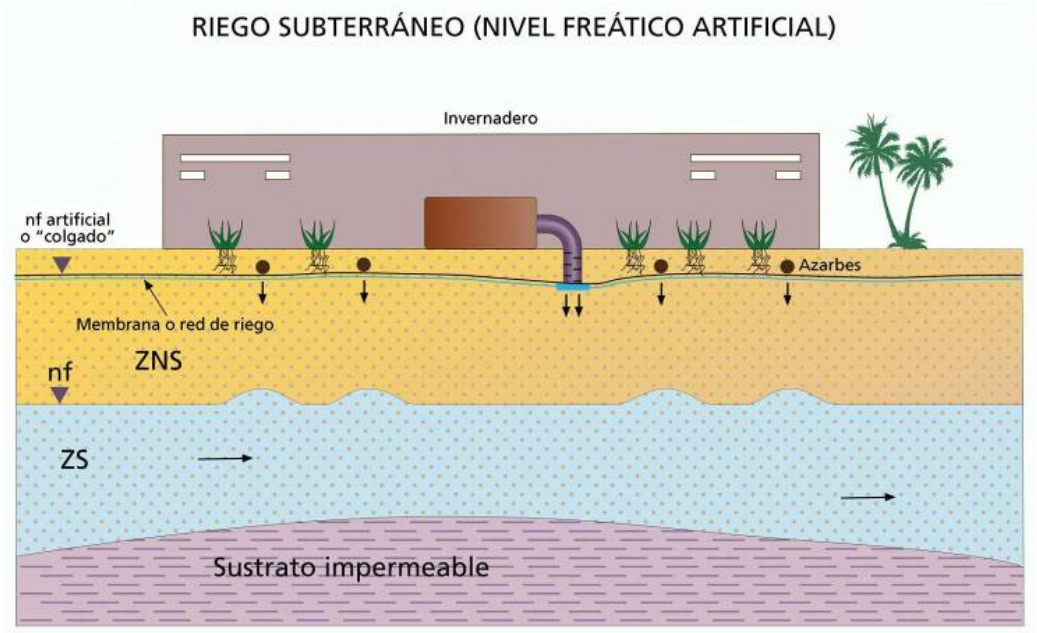


Figura 2-93. Esquema de un sistema de recarga artificial a través de un sistema de riego subterráneo.

El riego subterráneo puede conseguirse mediante varios métodos:

- A través de tuberías de goteo convencionales, con la precaución de que los goteros sean integrados, antidrenantes y con sistemas antiraíces, con objeto de evitar, en la

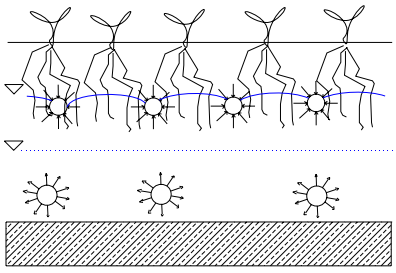
medida de lo posible, la obturación de los emisores.

- A través de tuberías de drenaje convencionales, si bien el comportamiento hidráulico del agua en las mismas será diferente al que se presenta en el avenamiento. En esté último, el interior de la tubería se encuentra a presión atmosférica, pero en el caso de querer inyectar agua, la tubería estará en carga, lo cual deberá ser tenido en cuenta para diseñar el sistema y para predecir el movimiento del agua en el suelo.

- Mediante la elevación de niveles freáticos naturales a través de dispositivos de recarga artificial.

Este último método puede tener interés en determinadas zonas con niveles freáticos relativamente superficiales, puesto que se pueden aumentar las reservas hídricas del subsuelo de la zona, evitando fenómenos como por ejemplo la evaporación, quedando solucionado el regadío (Martínez Tejero, 2008).

No obstante, también existe una serie de condicionantes que se deben añadir a los anteriores. Este tipo de método se ha aplicado y se conocen casos concretos en acuíferos libres, sin conocer el efecto en acuíferos semiconfinados y acuitardos, que a pesar de presentar una elevada conductividad hidráulica, la potencia del sustrato permeable es razonablemente pequeña como para que la recarga y el riego sean posibles.



Figuras 2-94 a) y b). a) Esquema de un sistema de recarga artificial mediante riego subterráneo (Martínez, 2008); b) Ejemplo de un campo donde hay instalado un sistema de riego subterráneo.

Como precaución, debería instalarse un sistema de drenaje para evitar subidas accidentales del nivel freático (como por ejemplo en un período de lluvias anormalmente largo) para evitar la posible asfixia radicular en un determinado cultivo (Martínez, 2008).

LLUVIA (22)

La captación de agua de lluvia es, en su sentido más amplio, la recolección de la escorrentía superficial para uso productivo. Esto generalmente implica la acumulación de agua de lluvia de un área extensa para su uso en un área de menor tamaño, bien sea para riego o para recarga de agua subterránea. (Gale, 2005).

22- Captación de agua de lluvia

En gran número de poblaciones, especialmente las situadas en zonas rurales o remotas, utilizan o dependen desde hace mucho tiempo, de sistemas de captación de agua de lluvia
Sin embargo, hasta hace poco, la recogida de pluviales no ha sido objeto de investigación o no ha tenido un esfuerzo político significativo. En respuesta a la presente escasez de agua, está creciendo un nuevo interés por la ciencia, la seguridad y la gestión de las captaciones de agua de lluvia, sistemas de drenaje urbano y otros tipos de fuentes de agua

Aprovechar racionalmente parte del volumen de agua de lluvia que discurre anualmente sobre la superficie del suelo no es sólo un sistema de recuperación de aguas pluviales, sino que es también un método de controlar la erosión y las inundaciones, además de reducir la proporción de residuos sólidos que llegan a la red principal.

Normalmente, a lo largo de las carreteras, caminos, zonas con elevada pendiente, etc., se pierden grandes volúmenes de agua de lluvia por escorrentía superficial. Los sistemas de aprovechamiento de la escorrentía superficial consisten en la reconducción de ésta a través de canales, por gravedad, hacia áreas habilitadas para su almacenamiento o infiltración.

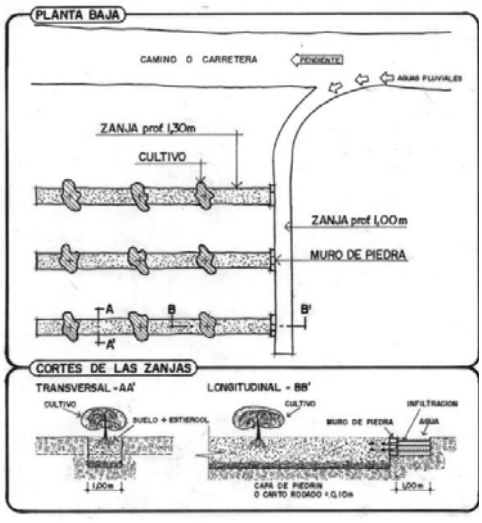
Estos sistemas están constituidos por lo general, por tres componentes básicos: un área de recolección del agua de lluvia, un sistema de subirrigación o distribución y una zona de almacenamiento o infiltración. El diseño y las dimensiones de los sistemas de captación de agua de lluvia están directamente relacionados con el volumen total de agua que va a ser recuperada.

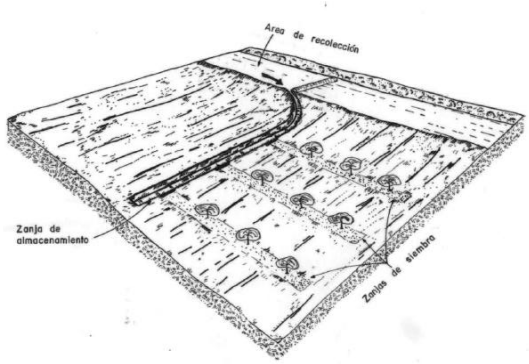
Hay una gran diversidad de sistemas de captación de agua de lluvia, como son los muros de piedra de contorno, barreras vivas y barreras muertas, cultivo en terrazas niveladas o terrazas individuales, etc.

Figuras 2-95 a) a c). a) La utilización de muros de piedras de contorno; b) Terraza individuales; c) Barreras muertas. Tomadas de: http://www.tierramor.org/permacultura/suelos&agua.htm.

Un ejemplo de sistemas de captación de agua de lluvia son las llamadas galerías filtrantes para subirrigación, que conducen el agua desde las carreteras y caminos que dan acceso a la población hasta los campos de cultivo, donde se infiltra a través de unas zanjas especialmente diseñadas para ello.

Estas zanjas deben ir protegidas por una capa basal de 5 a 10 cm de gravas, gravilla o arena. El objetivo de esta capa de piedra es aumentar la velocidad del flujo del agua hasta el final de la zanja de infiltración, para que la distribución de la humedad en el perfil del suelo sea lo más uniforme posible.

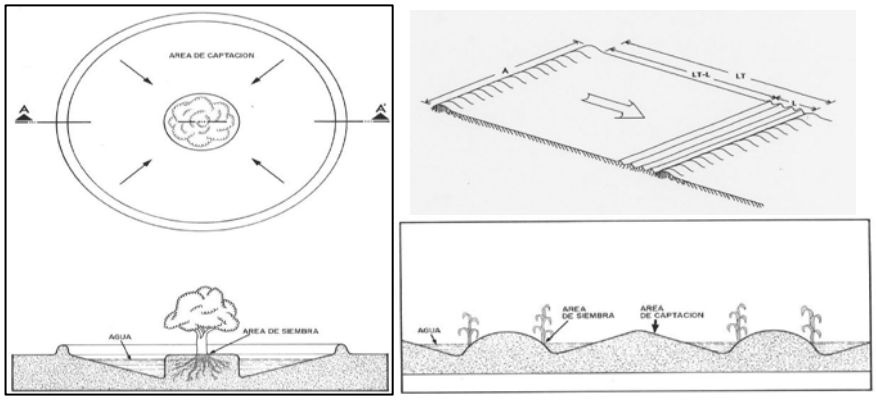




Figuras 2-96 a) y b). Esquema de un sistema de captación de agua de escorrentía en caminos. Tomadas de A. de Souza Silva, E. Rocha Porto, H. de Oliveira Lopes, 2000.

En general, los caminos son construidos de tal forma que el agua discurre hacia los laterales, donde se localizan los drenes recolectores o cunetas. Dependiendo de la pendiente del terreno y de la intensidad de la lluvia, el volumen de escorrentía que se obtiene varía. En caminos de tierra, el caudal de escorrentía debe ser interceptado por una pequeña banqueta o bordos de tierra o dique de aproximadamente 0,5 m de altura, donde se ubica el inicio de la zanja de infiltración (figura 2-96 a)).

Existen diversidad de modelos para la captación de agua de lluvia "*in situ*", a continuación se muestran algunos ejemplos de los mas utilizados.



Figuras 2-97 a) a c). a) Modelo esquemático de la técnica de captación de agua de lluvia "in situ" para frutales o cultivos perennes con microcuencas de captación individual para cada árbol (izquierda). b) Sección entre dos bordos antierosivos, donde se muestra la superficie destinada a escorrentía y siembra. La superficie de cultivo y de infiltración corresponde a la zona denominada como "L", situada aguas arriba del bordo o muro; el resto corresponde a la superficie de intercepción (derecha superior). c) Técnica de captación de lluvia a través del modelo "W" (derecha inferior). Tomado de Velasco Molina, 2000.

También existen gran número de sistemas de captación que pueden aplicarse en zonas urbanas, como es la captación de agua de lluvia en superficies impermeables urbanas, asfalto, techos de viviendas, etc.

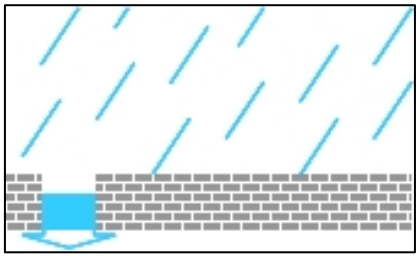


Figura 2-98. Icono propuesto para representar el dispositivo de recarga mediante captación de agua de lluvia en improductivo.

Figura 2-99. Esquema de un sistema de captación de agua de lluvia en techos.

La recolección de agua de lluvia de los techos permite aprovechar el agua de lluvia para consumo directo o para la recarga artificial del agua subterránea. Este método consiste en conectar los conductos de salida del desagüe del techo a un sistema para desviar el agua de lluvia hacia pozos preexistentes o tanques de reserva. Las cañerías de desagüe, las superficies de los techos y los tanques de almacenamiento deberían ser construidos a partir de materiales químicos inertes, por ejemplo plástico, aluminio, hierro galvanizado o fibra de vidrio, para evitar la contaminación del agua de lluvia.

Figura 2-100. Imagen de un sistema de captación y almacenamiento de agua de lluvia para riego y uso domestico no potable. Tomado de http://www.construible.es/noticiasDetalle.aspx?id=2453&c=6&idm=10&pat=10

Cuando el agua es utilizada para consumo directo, las primeras lluvias que se recuperan son desviadas de los sistemas de almacenamiento o recarga. Esto se debe a que son aguas de muy mala calidad, ya que arrastran suciedad acumulada en el área de recolección y desagües. Las fuentes más importantes de contaminación son la deposición aérea, contaminación atmosférica, insectos, y excrementos de aves y otros animales. La contaminación bacteriana puede ser minimizada manteniendo la superficie de los techos y los desagües limpios, pero no puede ser completamente eliminada.

Las ventajas de recolectar y almacenar agua de lluvia en áreas urbanas incluye la reducción de la demanda de sistemas de abastecimiento, así como también la reducción de la cantidad de escorrentía de agua durante las tormenta y consecuente de inundación.

Tras diversos estudios realizados en 2003 y 2004 para evaluar la recuperación, almacenamiento y reutilización de las aguas pluviales de la ciudad de Sydney (Australia), en 2005 se aprobó la realización de un proyecto de recuperación de las aguas de escorrentía del aparcamiento del Centro de Entretenimiento y del puente de la Calle Pier.

En cuanto a su diseño y funcionamiento, el agua es almacenada en 21 tanques de acero diseñados especialmente, con una capacidad de 600.000 litros, y están situados en el espacio no utilizado del aparcamiento del Centro de Entretenimiento de Sydney. El agua llega hasta los tanques mediante un sistema de derivaciones desde las tuberías de bajada de aguas pluviales que proviene del tejado del aparcamiento. Desde los tanques el agua es conducida mediante tuberías de riego hasta los parques y jardines de Darling Harbour. Los tanques tienen una rejilla en la parte superior que facilita el acceso al interior para la limpieza y mantenimiento.

En total se recupera un volumen de alrededor de 4.500.000 litros al año, volumen equivalente al de dos piscinas olímpicas y que es recuperado y reutilizado (Cardno Willing, 2007).

SUDS (23-24)

Del mismo modo que ocurre con la captación de agua de lluvia “in situ”, el empleo de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (en adelante SUDS) se está convirtiendo en una estrategia de gran éxito para mitigar los impactos ambientales de las zonas rurales y urbanas. Se tata de una tecnología relativamente incipiente y en permanente mejora, sin embargo, todavía existen aspectos que requieren un fuerte desarrollo como son los diseños, costes, mantenimiento, etc. Junto con los SUDS se ha agregado a esta tipología un sistema de recarga artificial accidental constituido por fugas desde las conducciones.

23- Recarga artificial accidental desde conducciones y alcantarillado

Las fugas de las conducciones de agua potable, aguas residuales y pluviales de las redes de distribución urbanas pueden contribuir significativamente a la recarga de las aguas subterráneas, así como al control de las inundaciones.

Figura 2-101. Icono propuesto para representar la recarga artificial “accidental” por fugas de conducciones y alcantarillado.

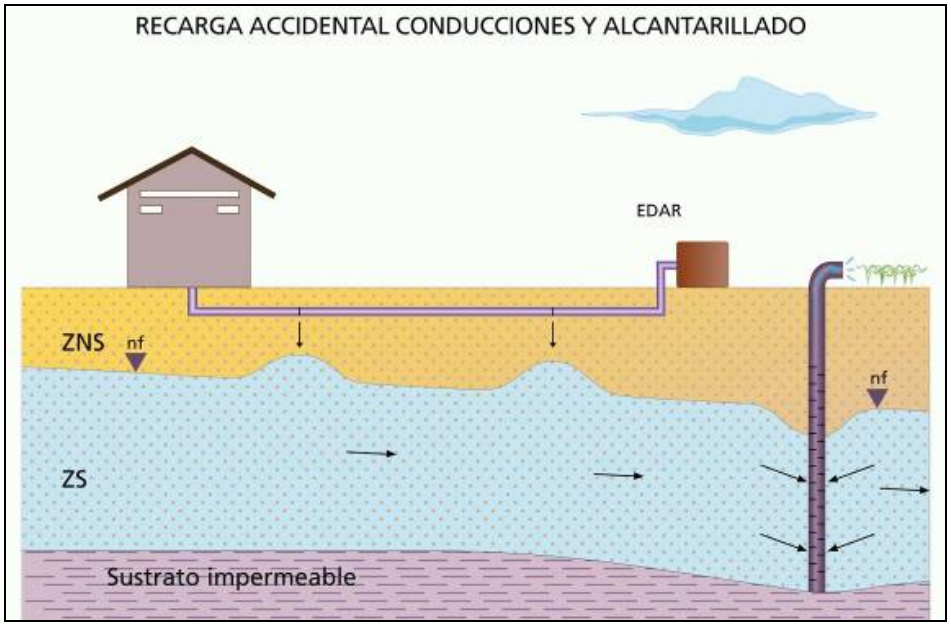


Figura 2-102. Esquema de un sistema de recarga accidental por conducciones y alcantarillado.

Tanto las perdidas ocasionadas en los sistemas de alcantarillado de las grandes ciudades, como las pequeñas fugas de los sistemas de distribución, suponen un aporte a tener en cuenta en cuanto a los volúmenes de recarga del acuífero se refiere. Aunque no pueda considerarse como un sistema aplicable para solucionar problemas de déficit hídrico, si se debe valorar como un método de AR, ya que modifica la recarga natural del acuífero ampliándola de forma considerable en algunos casos (figura 2-102).

Algunas de estas pérdidas representan un volumen importante respecto al volumen que se distribuye a través de estos sistemas, ya que en algunos casos las pérdidas o roturas son demasiado frecuentes y la eficiencia de las redes es muy variable. A su vez los gastos de reparación de estos sistemas suponen un gran desembolso para las entidades responsables de su cuidado y mantenimiento.

EL PAÍS.com Tecnología

CHARLA DIGITAL Sigue el encuentro digital con el Inspector jefe de la Brigada de Investigación Tecn

La rotura de una tubería del Canal de Isabel II causa inundaciones en dos calles de Madrid

El siniestro tuvo lugar cuando una excavadora perforó por accidente una tubería de gran capacidad

La rotura de una arteria de conducción del Canal de Isabel II, entidad suministradora de agua en Madrid, ha causado inundaciones de hasta medio metro en dos céntricas calles del distrito madrileño de Usera, que ha quedado colapsado tanto para el paso de peatones como de vehículos.

Según ha informado un portavoz de Emergencias-Madrid, a causa de la rotura, que se produjo sobre las ocho y media de la tarde, han resultado afectados varios tramos de las calles Antonio Leyva y Antonio López, además de parte de la glorieta del Marqués de Vadillo, donde los bomberos intervienen para evacuar el agua.

El siniestro, en el que ninguna persona ha resultado herida, ocurrió cuando unos

adn.es / Madrid

Lunes, 19 de mayo de 2008.

La rotura de una tubería del Canal corta en Madrid uno de los nuevos túneles de la M-30

El bypass sur en Marqués de Vadillo ha estado desde las durante casi siete horas | La circulación se ha restablecido, aunque no totalmente | ¿Has sufrido atascos?

Las intensas lluvias en Madrid cortan un túnel de la M-30

Figuras 2-103 a) y b). Varias noticias en las que la rotura de tuberías del canal de abastecimiento principal de Madrid, produce diversas inundación y demás problemas.

A continuación se muestran dos sistemas de conducción y distribución deficientes.

Figuras 2-104 a) y b). Ejemplo de dos sistemas de conducción de agua deficientes, en los que se observan varias zonas de pérdida.

24- Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

Según un informe presentado por la ONU a principios de 2008, actualmente no es posible detener el proceso de urbanización. Actualmente existen 19 megaciudades con más de 10 millones de habitantes y según las previsiones del informe, en 2050 habrá 27 megametrópolis de estas dimensiones.

Al aumentar la población mundial hasta estos limites, el tamaño de las ciudades y la superficie que éstas ocupan ha aumentado, generando grandes áreas "impermeables" e "islas de calor", donde el comportamiento del agua es diferente respecto al resto de la cuenca.

Las superficies asfaltadas, aparcamientos, fachadas, tejados, etc., suman una superficie importante dentro del área urbana donde no existe infiltración natural o se reduce en gran medida. Las aguas de escorrentía provenientes del lavado de estas superficies impermeables, son drenadas en general y aportan gran cantidad de contaminantes a los ríos.

Figura 2-105. Icono propuesto para representar los dispositivos tipo SUDS

Figura 2-106. Esquema de un ejemplo de Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS).

Dentro de los sistemas urbanos de drenaje sostenibles, existe una gran diversidad de posibilidades para su aplicación, tanto en el ámbito rural como en grandes ciudades. El objetivo general de este tipo de sistemas es la recuperación del mayor volumen de agua de lluvia y la reducción de los sólidos en suspensión y demás contaminantes presentes.

Estos sistemas presentan gran número de ventajas: además de suponer un aporte de agua para recargar artificialmente los acuíferos, reducen el volumen y la proporción de sólidos que llega a la red principal de alcantarillado y a las depuradoras, reducen el riesgo de inundaciones, mejoran sustancialmente la calidad de los efluentes reduciendo el impacto de su vertido en el cauce fluvial, etc.

Los sistemas de drenaje pueden tener diversas funciones, desde la retención temporal de agua de lluvia, para favorecer la sedimentación de los sólidos en suspensión y favorecer la infiltración natural, hasta la recuperación de importantes volúmenes de agua para su reutilización. Por muy simples que parezcan en un principio, algunas de estas medidas son realmente eficientes y cada vez son más empleadas en diversos países de todo el mundo.

Figuras 2-107 a) y b). a) Pavimentos permeables en el parque Gómeznarro, Madrid; b) Aparcamiento permeable en Hallstatt, Austria.

Durante el comienzo de la lluvia se produce el lavado de las superficies de las zonas urbanas. El agua de escorrentía acumula diversos tipos de contaminantes procedentes del motor de los vehículos, contaminación atmosférica, carreteras, aparcamientos, etc. Algunos de estos contaminantes son bifenilos policlorados (BPC), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), organofosforados, alquitranes de hulla, plaguicidas y herbicidas. Todos ellos tienen efectos nocivos en la salud y se acumulan en suelos y cursos de agua, provocando graves daños para el medio acuático.

Figura 2-108. La utilización de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) favorece el control de inundaciones ya que aumentan la superficie de infiltración efectiva.

El mecanismo hidrodinámico común para la mayoría de estos sistemas queda sintetizado en la regla de las tres eses:

Slow it down
Spread it out
Soak it in (páralo, extiéndelo e infíltralo).

Estos sistemas de drenaje pueden clasificarse según la función que desempeñan. Se establecen por lo tanto cuatro grupos principales:

1. Sistemas de control en origen.
2. Sistemas de transporte permeable.
3. Sistemas de tratamiento pasivo.
4. Medidas preventivas.

- Los sistemas de control en origen reducen la escorrentía superficial y aumentan la infiltración inicial. Dentro de este grupo pueden incluirse la instalación de superficies y pavimentos permeables, la construcción de pozos y depósitos de infiltración para el almacenamiento e infiltración del agua de escorrentía. Otro método que puede incluirse dentro de este grupo son las cubiertas vegetales, que además de retener al agua de lluvia y reducir el “efecto isla” aportan un valor estético a la ciudad.

- Dentro de los *sistemas de transporte permeable* se incluyen los drenes filtrantes y las cunetas verdes. Ambos almacenan la escorrentía superficial para luego transportarla hasta la red de alcantarillado, humedales artificiales, etc. Estos sistemas, además de depurar el agua, favorecen la infiltración y la recarga inducida de los acuíferos.

Figura 2-109. Ejemplo de un humedal artificial, Bolivar, Adelaida (AS).

- Los dispositivos incluidos dentro del grupo de *sistemas de tratamiento pasivo*, tienen como principal función la eliminación de los sólidos en suspensión, aceites, materia orgánica y demás contaminantes que aporta el lavado producido por las primeras lluvias. Dentro de este grupo estarían las zanjas drenantes y los depósitos de detención (superficiales o enterrados). Ambos suelen situarse en las proximidades de camino y carreteras, para la sedimentación y filtrado de las aguas del primer lavado.

Los humedales artificiales urbanos constituyen otro tipo de depuración natural del agua de escorrentía.

Figuras 2-110 a) y b). Ejemplos de franja filtrante en Burdeos, Francia y filtro de grava confinada en Arganzuela, Madrid.

- En cuanto las *medidas de prevención*, su principal objetivo sería la concienciación social y la educación ambiental, lo cual facilitaría el funcionamiento y mantenimiento del resto de sistemas.

EL PAÍS.com España

Inicio Internacional España Deportes Economía Tecnología Cultura Gente y TV Sociedad Opinión Blogs Participa

Andalucía | Cataluña | Comunidad Valenciana | Galicia | Madrid | País Vasco

CHARLA DIGITAL Sigue en DIRECTO la entrevista con los lectores de Lorenzo Sanz

El estanque de Arroyofresno empezará a almacenar aguas torrenciales en 2009

El Ayuntamiento asegura que evitará la saturación del alcantarillado y los vertidos al Manzanares mientras el PSOE subraya que su "único fin" es evitar que se inunden los túneles de la M-30

AGENCIAS - Madrid - 23/07/2007

La concejala de Medio Ambiente del Ayuntamiento de Madrid, Ana Botella, ha visitado hoy las obras del estanque de tormentas de Arroyofresno, que será "uno de los más grandes del mundo" y estará concluido a finales de 2009. Con una capacidad de 400.000 metros cúbicos -como ocho estanques del Retiro- este depósito almacenará, si caen de forma abundante, el agua de las lluvias para evitar que saturen la red del alcantarillado y lleguen al río Manzanares sin depurar, un objetivo que, a juicio de Botella, demuestra la "apuesta real" del consistorio "con el Medio Ambiente y la sostenibilidad".

ana Botella
A FONDO
Nacimiento: 24-07-1953
Lugar: (Madrid)

"Con esta obra, la capital de España estará contribuyendo de manera esencial a llevar a la práctica la directiva europea sobre aguas residuales", destacó la edil, quien señaló que,

Botella, durante su visita el estanque, en una imagen cedida por el Ayuntamiento de Madrid.-

Figura 2-111. La instalación de un sistema de drenaje urbano favorecerá el control de las inundaciones en Madrid.

Esto sistemas representan una novedad en la mayoría de ciudades españolas, siendo muy positiva su implantación y divulgación a todos los niveles organizativos, tanto a nivel local como de cuenca.

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En un momento en que la disponibilidad de los recursos hídricos es un tema de interés general, los dispositivos de gestión de la recarga de acuíferos se presentan como una seria alternativa en los planes de gestión hídrica, frente a los sistemas más tradicionales.

Aunque algunos de estos dispositivos se utilizan desde hace años, la mayoría está siendo objeto de intensas investigaciones para establecer unos parámetros de diseño, control y mantenimiento que faciliten su utilización de forma generalizada, dejando gran cabida a la innovación.

Se da la circunstancia de que estos tipos de dispositivos son los únicos que pueden instalarse con garantía de éxito en algunas zonas, como pueden ser acuíferos sobreocupados en superficie, o bien son precisos para restaurar impactos ambientales, como es el caso de algunos acuíferos sobreexplotados.

Aunque la instalación de algunos dispositivos de gestión de la recarga puede resultar compleja y llevar consigo algunos problemas durante la etapa de construcción y funcionamiento, la mayoría de estos problemas pueden evitarse o reducirse mediante la realización previa de estudios detallados y la adopción del dispositivo más correcto para cada circunstancia.

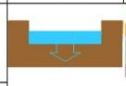
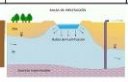
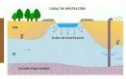
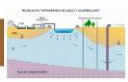
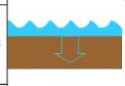
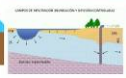
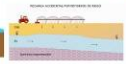
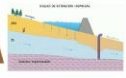
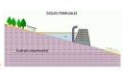
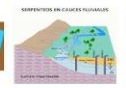
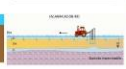
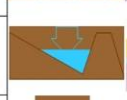
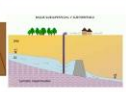
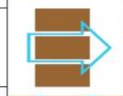
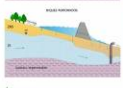
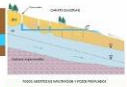
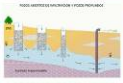
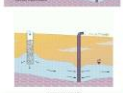
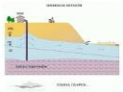
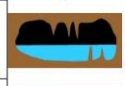
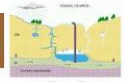
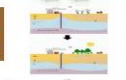
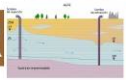
A pesar de que se hayan producido algunos fracasos en este campo, la mayoría de los dispositivos de gestión de la recarga tienen éxito y se consigue alcanzar los objetivos planteados. El avance del estado del arte está permitiendo experiencias positivas en lugares donde antaño se consideraban zonas poco propicias para la gestión de la recarga de acuíferos, como acuíferos fracturados o kársticas.

Una estrategia conjunta de conservación del agua, que incluyera en sus planes tanto la regeneración y reutilización de aguas como los sistemas de gestión de la recarga, supondría una mejora capaz de satisfacer la creciente demanda de agua. Por ejemplo, en zonas donde existe una importante variación estacional en la demanda, como son las áreas costeras, la utilización conjunta de los sistemas de almacenamiento y de regeneración/recuperación está teniendo un gran éxito no sólo para abastecimiento de la población sino también en la lucha contra la intrusión salina

Las autoridades competentes deberían incluir tanto en la planificación, desarrollo, y realización de los proyectos, la integración conjunta de los sistemas de AR, tanto a nivel nacional, regional y de cuenca, como parte del conjunto de estrategias de gestión del agua.

En el anexo 1 se presenta una síntesis de todos los dispositivos descritos, con su correspondiente icono, esquema y ejemplo (fotografía). Todos ellos son descritos conforme a: Es deseable, pros, problemas generados o previsibles y aspectos medioambientales a tener en cuenta

ANEXO 1. PANEL RESUMEN

N	SISTEMA	TIPO DE DISPOSITIVO	ICONO	FIGURA	FOTO	LEYENDA
1	DISPERSIÓN	BALSAS DE INFILTRACIÓN / HUMEDALES				Humedal artificial para la recarga del Sanchón, Coca, Segovia. Foto: DINA-MAR
2		CANALES Y ZANJAS DE INFILTRACIÓN				Canal de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste, Segovia, Spain, operativa desde 2002. Foto: DINA-MAR.
3		CABALLONES/TÉCNICAS DE TRATAMIENTO SUELO/ACUÍFERO				Caballones en el fondo de una balsa de infiltración. California. Foto: D. Peyton
4		CAMPOS DE INFILTRACIÓN (INUNDACIÓN Y DIFUSIÓN CONTROLADA)				Campo de infiltración de Omdel (Namibia). Foto: G. Tredoux.
5		RECARGA ACCIDENTAL POR RETORNOS DE RIEGO				Recarga artificial por retornos de riego. Extremadura, España.
6	CANALES	DIQUES DE RETENCIÓN Y REPRESAS				Dique de recarga artificial en cabecera de cuencas, Alicante
7		DIQUES PERMEABLES				Dique permeable en Huesca. Foto: Tragsatec.
8		SERPENTEOS / LEVEES				Serpenteos en Sacramento, California. Foto: A. Hutchinson.
9		ESCARIFICACIÓN LECHO				Escarificación del lecho del rio Besós, Barcelona. Foto: J. Armenter.
10		DIQUES SUBSUPERFICIALES/SUBTERRÁNEOS				Dique subsuperficial (embalse de arena) en Kytui, Kenia. Foto: Sander de Haas.
11		DIQUES PERFORADOS				Dique perforado. Lanjarón, Granada, España. Foto: Tragsatec.
12	POZOS	QANATS (GALERÍAS SUBTERRÁNEAS)				Qanat de Carbonero el Mayor. Segovia. Foto: E.F. Escalante
13		POZOS ABIERTOS DE INFILTRACIÓN				Pozo abierto de infiltración. Arizona, USA. Foto: DINA-MAR
14		POZOS PROFUNDOS Y MINISONDEOS				Pozo de recarga artificial. Cornellá, Barcelona. Foto: DINA-MAR
15		SONDEOS				Sondeo para MAR (ASR) en Adelaida. Foto: P. Dillon.
16		DOLINAS, COLAPSOS...				Colapso cárstico "El Hundimiento". Alicante, España. Foto: DINA-MAR
17		ASR				Dispositivo ASR en Scottsdale, Arizona. Foto: DINA-MAR
18		ASTR				Dispositivo ASTR en California.

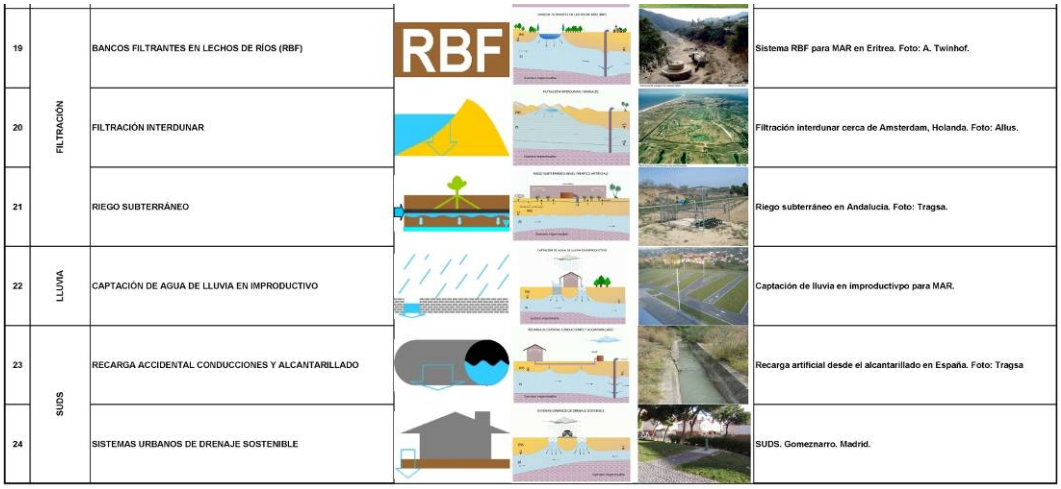


Figura 2-112. Síntesis de todos los dispositivos descritos, con su correspondiente icono, esquema y ejemplo (fotografía).

ANEXO 2. CONDICIONANTES DE CADA DISPOSITIVO: ES DESEABLE, PROS, PROBLEMAS GENERADOS Y ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES.

N	SIST	TIPO DE DISPOSITIVO	CONDICIONANTES	
1	DISPERSIÓN	BALSAS DE INFILTRACIÓN / HUMEDALES	ES DESEABLE	Formaciones de alta permeabilidad Litología detrítica, aluvial o kárstica Idóneo en zonas regables con aguas subterráneas y acuíferos libres Pendientes de 0 a 10 % Niveles freáticos cercanos a la superficie (<50 m) Idóneo en zonas de depuradoras por lagunaje Fuentes de disponibilidad de agua a menos de 10 km
			PROS	Recarga acuífero libre
			PROBLEMAS GENERADOS	Ocupación terreno Necesidad vallado perimetral Taludes estables para cada litología Necesidad de operaciones de limpieza y mantenimiento en seco Necesidad acceso para maquinaria pesada Problemas de anegación en aluviales por desbordamientos En caso de calidad de aguas muy dispar se deben emplear técnicas de inducción de calidad
			ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Posibilidad uso para toma de agua (incendios forestales…) Posibilidad asentamiento avifauna Posibilidad regeneración hídrica ecosistemas húmedos degradados
2		CANALES Y ZANJAS DE INFILTRACIÓN	ES DESEABLE	Zonas con excedentes hídricos de origen fluvial o depuradoras Trazados lo más rectilíneos posible para evitar llagas y desprendimientos Pendientes menores del 20% Debe haber represas y dispositivos de parada que eviten el efecto cascading Las aguas deben cumplir el estandar de calidad legislado Conveniencia de evitar la oxigenación de las aguas por batido Conveniencia de intercalar abundantes puentes y dispositivos de paso Conveniencia de construir una vía de servicio paralela para el mantenimiento y limpieza Proclive a diseños de BCV específicos Controlar el nivel del agua en el canal con objeto de que la tasa de infiltración sea la mayor posible
			PROS	Posibilidad enterrar tramos mediante tuberías troqueladas en zanjas filtrantes Dispositivo idóneo en zonas de montaña en poblaciones (áreas urbanas)

		PROBLEMAS GENERADOS	Efecto barrera para determinadas especies Problemas de estabilidad de taludes dependientes de la morfología y litología Ocupación superficial del terreno Dificultad para el enterramiento del canal en tramos determinados Afección a algunas especies vegetales al inundar su zona radicular Desarrollo de especies vegetales en el fondo del canal (+/-) Dispositivo poco apropiado en zonas urbanas, salvo de montaña
		ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Efecto barrera Estabilidad de taludes Rápido crecimiento de vegetación de ribera (+/-)
3	**CABALLONES/ TÉCNICAS SAT**	**ES DESEABLE**	La distancia entre los caballones debe rondar los 80 cm en acuíferos arenosos En el fondo de canales arenosos se pueden intercalar geotextiles hasta el intervalo 40-60 cm de profundidad Se debe evitar el batido de las aguas
		PROS	Aumento de la tasa de infiltración al doble en detríticos frente a fondos planos Operaciones de limpieza más simples que en fondo plano. Es viable intercalar geotextiles semienterrados con objeto de facilitar las operaciones de limpieza Adecuados en zonas de cabecera Adecuados en llanuras de inundación
		PROBLEMAS GENERADOS	Necesidad de retirar a vertedero gran parte de los procesos colmatantes generados Posibilidad de transferir materiales colmatados por otros sin colmatar (minería de transferencia)
		ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Al ser estructuras intercaladas en dispositivos, su impacto adicional es positivo
4	**CAMPOS DE INFILTRACIÓN (INUNDACIÓN Y DIFUSIÓN CONTROLADA)**	**ES DESEABLE**	Terreno declarado zona inundable Cercanía a cauces fluviales, humedales o depuradoras (Máx. 2-3 km) Habituales junto a depuradoras por lagunaje Zonas de permeabilidad alta o muy alta Litología aluvial, kárstica o detrítica Pendientes menores del 10% En llanuras de inundación poco encajadas Adecuados en zonas costeras con altitud menor de 5 m (marismas)
		PROS	Uso estacional amortiguando inundaciones
		PROBLEMAS GENERADOS	Uso incompatible con canales o balsas de infiltración por riesgo de anegación Necesidad de mantenimiento en caso de labrar caballones En zonas inundables resulta incompatible con la presencia de otros dispositivos
		ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Alto valor en zonas inundables costeras y de marismas Lugar proclive para asentamiento de avifauna

5		**RECARGA ACCIDENTAL POR RETORNOS DE RIEGO**	**ES DESEABLE**	Zonas regables del PNR con aguas de origen superficial Zonas con riesgo de inundación muy bajo o nulo Aguas de salinidad baja o media En acuíferos libres con una profundidad del agua subterránea menor de 75 m Altos retornos en zonas urbanas por fugas de alcantarillado (recarga accidental)
			PROS	Zonas con permeabilidad media a muy alta y cualquier litología
			PROBLEMAS GENERADOS	Salinización del suelo con dosis de lavado escasas
			ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Los retornos en zonas regadas con aguas subterráneas conllevan impactos negativos Los retornos accidentales en zonas urbanas en ocasiones son aguas de baja calidad
6	**CANALES**	**DIQUES DE RETENCIÓN Y REPRESAS**	**ES DESEABLE**	Afloramientos permeables Litologías aluviales, kársticas, detrítico, volcánico e intrusivo por fisuración Adecuados en zonas regables Adecuados en las inmediaciones de embalses Adecuados en zonas con un cierto riesgo de inundación Adecuados en zonas de cabecera de cuenca y áreas forestales Idóneo incluso en zonas de elevadas pendientes (valles encajados) Los diques de corrección hidrológica conllevan recarga accidental En un rango altitudinal alto Proclive en macizos cristalinos con triple porosidad
			PROS	Uso conjunto adecuado para corrección hidrológico forestal y recarga artificial Permiten la laminación de avenidas Retención de aludes y movimientos gravitatorios en zonas de montaña
			PROBLEMAS GENERADOS	Retención de sedimentos Problemas de colmatación
			ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Cierto impacto visual negativo Retención de sedimentos Los impactos positivos sobrepasan los negativos
7		**DIQUES PERMEABLES**	**ES DESEABLE**	Afloramientos permeables Litologías aluviales, kársticas, detrítico, volcánico e intrusivo por fisuración Adecuados en zonas regables Adecuados en las inmediaciones de embalses Adecuados en zonas con un cierto riesgo de inundación Adecuados en zonas de cabecera de cuenca y áreas forestales Idóneo en valles fluviales con cualquier encajamiento Los diques de corrección hidrológica conllevan recarga accidental En un rango altitudinal alto y medio Proclive en macizos cristalinos con triple porosidad
			PROS	Uso conjunto adecuado para corrección hidrológico forestal y recarga artificial Permiten la laminación de avenidas

		PROBLEMAS GENERADOS	Retención de sedimentos Problemas de colmatación Necesidad de mantenimiento Frecuentes problemas geotécnicos (roturas, desprendimientos...)
		ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Cierto impacto visual negativo Retención de sedimentos Los impactos positivos sobrepasan los negativos
8	**SERPENTEOS / LEVEES**	**ES DESEABLE**	Dispositivo típico de formaciones aluviales Zonas con riesgo de inundación alto o medio Zonas de escasa pendiente (<10%) Acuíferos libres con el nivel del agua somero No es óptimo para zona urbanas Inapropiado para zonas de alta montaña y cabeceras de cuenca
		PROS	Formaciones aluviales Posibilidad de intercalar barreras artificiales (hinchables…) y estructuras flotantes
		PROBLEMAS GENERADOS	Impacto visual
		ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Incidencia en el régimen hidrodinámico del río Posible incidencia en la vegetación de ribera
9	**ESCARIFICACIÓN LECHO**	**ES DESEABLE**	Dispositivo típico de formaciones aluviales Zonas con riesgo de inundación alto Precisa agua de buena calidad Zonas de escasa pendiente (<10%) Acuíferos libres con el nivel del agua somero No es óptimo para zona urbanas Inapropiado para zonas de alta montaña y cabeceras de cuenca
		PROS	Formaciones aluviales Técnica barata
		PROBLEMAS GENERADOS	Afección vegetación acuática y especies piscícolas Algunos autores dudan de la efectividad del método
		ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Incidencia en el régimen hidrodinámico del río Posible incidencia negativa en la vegetación y fauna fluvial
10	**DIQUES SUBSUPERFICIALES/SUBTERRÁNEOS**	**ES DESEABLE**	Litologías aluviales, kársticas, detrítico, volcánico e intrusivo por fisuración Adecuados en zonas con afloramientos evaporíticos (incidencia en la calidad) Adecuados en las inmediaciones de embalses Idóneo incluso en zonas de elevadas pendientes (valles encajados) Los diques de corrección hidrológica conllevan recarga accidental Posibilidad de crear estructuras tipo aljibe protegidas de la evaporación
		PROS	Uso conjunto adecuado para corrección hidrológico forestal y recarga artificial Permiten el abastecimiento a pequeñas poblaciones con filtración Técnica parecida al RBF con inducción Permite corregir problemas geotécnicos en zonas urbanas

			PROBLEMAS GENERADOS	Retención de sedimentos Problemas de colmatación Requiere cierto mantenimiento y reemplazo eventual de la arena filtrante
			ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	No hay impacto visual Retención de sedimentos Los impactos positivos sobrepasan los negativos Mejora de la calidad de las aguas
11		**DIQUES PERFORADOS**	**ES DESEABLE**	Afloramientos permeables Litologías aluviales, detrítico, volcánico e intrusivo por fisuración Adecuados en zonas regables Adecuados en las inmediaciones de embalses Inapropiados en zonas con alto riesgo de inundación Adecuados en zonas de cabecera de cuenca, áreas forestales y minas Idóneo en valles fluviales con cualquier encajamiento Los diques de corrección hidrológica conllevan recarga accidental En un rango altitudinal alto y medio
			PROS	Uso conjunto adecuado para corrección hidrológico forestal y recarga artificial Permiten la laminación de avenidas
			PROBLEMAS GENERADOS	Retención de sedimentos Problemas de colmatación Necesidad de mantenimiento y taponamiento de conducciones Frecuentes problemas geotécnicos (roturas, desprendimientos...) No recomendable dentro de zonas urbanas Más alejado de cauces que los diques permeables
			ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Cierto impacto visual negativo Retención de sedimentos Los impactos positivos sobrepasan los negativos
12	**POZOS**	**QANATS (GALERÍAS)**	**ES DESEABLE**	Apropiado en materiales detríticos, kársticos y volcánicos Idóneos para inmediaciones de embalses Posibilidad de acondicionar minas abandonadas En zonas con pendientes elevadas, especialmente volcánicas Nivel del agua a una profundidad inferior a 50 m
			PROS	Adecuado para zonas áridas al reducir la evaporación
			PROBLEMAS GENERADOS	Riesgo de variaciones de la calidad de las aguas por su configuración Posibilidad de derrumbes y colapsos, especialmente tras eventos tipo avenida
			ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Escaso impacto visual
13		**POZOS ABIERTOS DE INFILTRACIÓN**	**ES DESEABLE**	Dispositivo apto para todas las litologías, incluido hard rocks No apto en zonas inundables En superficies con pendiente moderada o media Nivel del agua somero o intermedio (menos de 50 m) No apto en masas forestales

			PROS	Idóneo en las inmediaciones de depuradoras Idóneo alrededor de pequeños pueblos Idóneo cerca de la costa
			PROBLEMAS GENERADOS	Riesgo de contaminación apreciable
			ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Precisan de protección adecuada para evitar la caída de ganado y fauna
14		**POZOS PROFUNDOS Y MINISONDEOS**	**ES DESEABLE**	Dispositivo apto para todas las litologías, incluido hard rocks No apto en zonas inundables En superficies con pendiente moderada o media Nivel del agua somero o intermedio (menos de 50 m) No apto en masas forestales
			PROS	Idóneo en las inmediaciones de depuradoras Idóneo alrededor de pequeños pueblos Idóneo cerca de la costa
			PROBLEMAS GENERADOS	Riesgo de contaminación apreciable Posibles problemas geotécnicos en zonas urbanas y edificaciones Oxigenación de las aguas y reducción de la tasa de infiltración si el agua cae por gravedad desde la superficie
			ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Precisan de protección adecuada para evitar la caída de ganado y fauna
15		**SONDEOS**	**ES DESEABLE**	Dispositivo apto para litologías detríticas y kársticas No apto en zonas inundables En superficies con pendiente moderada Nivel del agua intermedio o profundo (más de 50 m) No apto en masas forestales Apto en zonas regables con aguas subterráneas
			PROS	Posibilidad de inyección profunda e inducida
			PROBLEMAS GENERADOS	Riesgo de salinización No apto en zonas con riesgo de inundación salvo protección extrema Requiere alimentación eléctrica para la inyección Sistema de valvulería complejo Caro de construir y mantener
			ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Posibilidad de problemas geotécnicos (asientos, grietas…)
16		**DOLINAS, COLAPSOS…**	**ES DESEABLE**	En zonas kársticas Posibilidad de utilizar minas abandonadas Requiere agua de buena calidad no recomendable en zonas urbanas
			PROS	Aprovechamiento de formas preexistentes
			PROBLEMAS GENERADOS	Hiperoxidación de los minerales del acuífero si el agua cae por gravedad
			ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Precisa conducciones desde las fuentes de toma (ríos, embalses y depuradoras) Posibilidad de riesgos geotécnicos elevados (nuevos colapsos)
17		**ASR**	**ES DESEABLE**	Dispositivo apto para litologías detríticas principalmente No apto en zonas inundables salvo altísima protección del dispositivo En superficies con pendiente moderada Nivel del agua profundo (más de 50 m) No apto en masas forestales Apto en zonas regables con aguas subterráneas
			PROS	Posibilidad de inyección profunda e inducida

			PROBLEMAS GENERADOS	Riesgo de salinización No apto en zonas con riesgo de inundación salvo protección extrema Requiere alimentación eléctrica para la inyección Sistema de valvulería complejo Precisa instalaciones complementarias
			ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Posibilidad de problemas geotécnicos (asientos, grietas…)
18		**ASTR**	**ES DESEABLE**	Dispositivo apto para litologías detríticas principalmente No apto en zonas inundables salvo altísima protección del dispositivo (en ambos sondeos) En superficies con pendiente moderada Nivel del agua profundo (más de 50 m) No apto en masas forestales Apto en zonas regables con aguas subterráneas Requiere un alto conocimiento del acuífero y de la zona de tránsito
			PROS	Posibilidad de inyección profunda e inducida
			PROBLEMAS GENERADOS	Riesgo de salinización No apto en zonas con riesgo de inundación salvo protección extrema Requiere alimentación eléctrica para la inyección Sistema de valvulería complejo Precisa instalaciones complementarias Carestía en su construcción y mantenimiento
			ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Posibilidad de problemas geotécnicos (asientos, grietas…) Cambios cualitativos esperables Problemas derivados de la introducción de aire en el acuífero
19	FILTRACIÓN	**BANCOS FILTRANTES EN LECHOS DE RÍOS (RBF)**	**ES DESEABLE**	Formaciones exclusivamente aluviales Adecuada en la inmediación de embalses Zonas de pendiente muy baja en general Calidad de las aguas aceptable Zonas con el nivel del agua relativamente somero
			PROS	La técnica permite su asociación de depuradoras de tamaño medio y elevado Idóneo para abastecimiento de ciudades fluviales
			PROBLEMAS GENERADOS	Determinadas sustancias no son reducidas mediante la técnica RBF Problemas de colmatación frecuentes Su ubicación en zonas inundables requiere una alta protección de las captaciones
			ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Muchas más ventajas que desventajas Requiere tuberías y canalizaciones que conecten el banco del río con la ciudad
20		**FILTRACIÓN INTERDUNAR**	**ES DESEABLE**	En facies detríticas Suelen venir cartografiadas como dunas A escasa distancia de la costa Zonas áridas en general Baja altitud Salinidad media y alta
			PROS	suelen contar con cartografías detalladas
			PROBLEMAS GENERADOS	Dificultad en dunas fosilizadas
			ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Suelen ser zonas muy frágiles desde el punto de vista ecosistémico Dificultad para llevar a cabo actuaciones con bajo impacto (ecosistema muy frágil)

21		**RIEGO SUBTERRÁNEO**	**ES DESEABLE**	Nivel del agua somero Recarga en general accidental Zonas regables con aguas de cualquier origen excluyendo retornos
			PROS	Técnica de aprovechamiento de fugas Uso de dosis excesivas de lavado del suelo en el regadío
			PROBLEMAS GENERADOS	Si la dosis de lavado es adecuada y la eficiencia del riego alta, la recarga es despreciable
			ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Solo los sistemas de gestión inapropiados permiten esta técnica
23	**LLUVIA**	**CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA EN IMPRODUCTIVO**	**ES DESEABLE**	Aguas de buena calidad tras interaccionar con el suelo (excluye terrenos evaporíticos)
			PROS	Aprovechamiento en zonas con excedentes hídricos Adecuado en zonas urbanas Cartografía de improductivo (superficies asfaltadas)
			PROBLEMAS GENERADOS	El agua se carga de contaminantes nocivos en áreas urbanas (HC, grasas…)
			ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Problemas hidrológicos en avenidas punta
24	**SUDS**	**RECARGA ACCIDENTAL CONDUCCIONES Y ALCANTARILLADO**	**ES DESEABLE**	Recarga accidental En zonas urbanas
			PROS	
			PROBLEMAS GENERADOS	Mosquitos y fauna no deseada Malos olores por agua estancada. Mantenimiento necesario de limpieza y vegetación. Problemas de colmatación Escasa conciencia ciudadana para limpieza y no contaminación por vertidos
			ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Elemento que permite valorar las fugas de forma menos adversa
25		**SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE**	**ES DESEABLE**	Elenco de elementos de gestión propios de zonas urbanas
			PROS	Aprovechamiento integral de las aguas en zonas urbanas
			PROBLEMAS GENERADOS	Problemas en general de carácter hidrológico y cualitativo.
			ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	Tipologías tan variadas que requieren estudios concretos

BIBLIOGRAFÍA

- 51 Congreso Internacional de Americanistas (2003). Memorias "El Acceso al Agua: Un Problema Histórico y Actual". In extenso del Simposio pat-9. Santiago de Chile, del 14 al 18 de Julio del 2003.
- AGBAR (1987). "Recárrega artificial dáqüífers als deltas des rius Llobregat y Besós". Monografía nº 3. Aigües de Barcelona.
- AGBAR (2007). "Dispositivos de recarga artificial de acuíferos en Barcelona".
- Apaza Idme, D. (2006). Gestión Social del Agua y Ambiente en Cuencas (ISAAC). "Huarochiri: Las Amunas, recarga artificial de acuíferos en Los Andes".
- COMISSIÓN EUROPEA (2001). "Guía Procesos Extensivos de Depuración de las Aguas Residuales Adaptadas a las Pequeñas y Medias Colectividades (500-5.000 H.E)" Aplicación de la directiva del Consejo nº 91/271 del 21 de mayo de 1991 sobre el tratamiento de las aguas urbanas residuales
- DINA-MAR (2007). "Proyecto para la gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible". Fase de desarrollo tecnológico 2007. Informe interno no publicado.
- Fernández Escalante, A.E, García Rodríguez, M y Villarroya Gil. F. (2005). "Inventario de experiencias de recarga artificial de acuíferos en el mundo". Tecnologí@ y Desarrollo. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Volumen III. Universidad Alfonso X el Sabio. Escuela Politécnica Superior. Villanueva de la Cañada (Madrid).
- Fernández Escalante, A.E. (2005). "Recarga Artificial de Acuíferos en Cuencas Fluviales. Aspectos Cualitativos y Medioambientales. Criterios Técnicos derivados de la experiencia en la Cubeta de Santiuste (Segovia.)". Tesis Doctoral. UCM.
- Gale, .I (2005). "Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas". UNESCO IHP.
- García Rodríguez, J.L. "Proyecto Determinación de Estándares de Ingeniería en Obras de Conservación y Aprovechamiento de Aguas y Suelos, para la Mantención e Incremento de la Productividad Silvícola": Proyecto E.I.A.S. Universidad: Talca (Chile).
- IGME. (1995). "Nuevas tecnologías para el saneamiento, depuración y reutilización de las aguas residuales en la provincia de Alicante".
- Lemus Vera, M. (2000). **"**Metodología de Diseño de Zanjas de Infiltración y Canales de Desviación de Agua". Organización de las Naciones Unidas, para la Agricultura y la Alimentación. Manual de Captación y Aprovechamiento del Agua de lluvia. Experiencias En América Latina. Serie: Zonas Áridas y Semiáridas. Nº 13. Santiago de Chile.
- Martín-Loeches Garrido. M y Rebollo Ferreiro. L.F. "Las Aguas Superficiales y Subterráneas en el Campus Externo de la Universidad de Alcalá". Departamento de Geología Universidad de Alcalá.
- Molina-García, J.M., Pulido-Bosch, A., López Martos, J., Marín, A, Gisbert, J, Vallejos, A. y Fructuoso, M. "Aprovechamiento de aguas de tormentas para recargar acuíferos en regiones semiáridas". G. I. Recursos Hídricos y Geología Ambiental. Universidad de Almería, Ministerio de Medio Ambiente, Consejería de Obras Públicas de la Junta de Andalucía.

- Murray, R, Tredoux, G, Ravenscroft, P, Botha, F. “Peace River, Florida: Large scale ASR in a limestone aquifer”. Artificial Recharge Strategy. Department of Water Affairs and Forestry.
- Quipuzco Ushñahua**,** L. E “Valoración de las Aguas Residuales en Israel como un Recurso Agrícola: Consideraciones a tomar en cuenta para la Gestión del Agua en El Perú”.
- Ramos González, G, Sánchez Guzmán, J, López-Geta, J.A. “Usos Alternativos de los Acuíferos”. Instituto Geológico y Minero de España. Tecnología y Recursos de la Tierra, S.A.
- REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS (2005). “El viaje del agua qanats de la Fuente Grande de Ocaña (Toledo): Pervivencia de una reliquia hidráulica”.
- SMART WATER HARVESTING SOLUTIONS. (2007). “Examples of Innovative, Low-Cost Technologies for rain, fog, runoff water and groundwater”.
- Stephen. F. (2004). “Brasil, Kenia: Presas Sub-superficiales para Aumentar el Almacenamiento de Agua Subterránea en Terrenos con Basamento para la Subsistencia Humana”. Universidad Federal de Pernambuco (UFPE) – Brasil y Fundación SASOL. Ministerio de Recursos Hídricos e Irrigación, Kenia.
- STORMWATER INDUSTRY ASSOCIATION (NSW) INC. “Darling Harbour Stormwater Harvesting”. Cardno Willng (NSW) Pty Ltd. Sydney Harbour Foreshore Authority. 2007 Awards for excellence.
- THE NATIONAL ACADEMIES. (2007). “Committee on Sustainable Underground Storage of Recoverable Water, National Research Council”.
- UNIDAD DE APOYO TECNICA PARA EL SANEAMIENTO BASICO DEL AREA RURAL. “Especificaciones técnicas para el diseño de zanjas y pozos de infiltración”. (2003). Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Área de desarrollo sostenible y Salud Ambiental.
- UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS “Revista del Instituto de Investigación“. (2004). FIGMMG. Vol. 7, Nº. 13, 64-72.
- Willing, V. “Darling Harbour Storm water Harvesting System”.
- Muñoz Muñoz, JA. (2003). “Aprovechamiento hidráulico integral en un entorno tradicional y árido. Campos de Níjar (Almería)”.
- OFICINA REGIONAL DE LA FAO PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE. (2000). “Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia. Experiencias en América latina serie: Zonas áridas y semiáridas no 13 (2000)”.
- WULFF. H.E. (2004). “The Qanats of Iran”

- This executive summary plus thousands more available at www.nap.edu.
- http://www.tierramor.org/permacultura/suelos&agua.htm
- http://www.upm.es/rinternacional/iberoamerica/docs/Garcia_Rodriguez.pdf
- http://www-en.us.es/ciberico/archivos_word/49b.doc
- www.h2ogeo.upc.es/seminarios/2006/Manuela%20Barbieri%2026_01_2006.pdf
- http://siteresources.worldbank.org/INTWRD/Resources/GWMATE_Spanish_CP_05.pdf (BRASIL)
- http://aguas.igme.es/igme/publica/libro36/pdf/lib36/in_08.pdf
- http://www.fao.org/ag/agl/agll/wocat/wqtsum9.asp?questid=BOL08
- http://eias.utalca.cl/9Simulador_EIAS/simulador.php
- http://www.ecy.wa.gov/programs/wr/asr/asr-home.html
- http://www.connectedwater.gov.au/framework/water_quality.html

- http://www.clw.csiro.au/research/urban/reuse/projects/ASTRbrochure.pdf
- http://www.wme.com.au/categories/water/dec8_07.php
- http://www.wme.com.au/categories/water/
- http://www.waterhistory.org/histories/qanats/
- http://www.waterhistory.org/histories/syria/
- http://aguas.igme.es/igme/publica/libro33/pdf/lib33/cap_4.pdf
- http://websql.procuraduria.gov.co/relatoriaweb/dependencia/2ContratacionEstatal/2007/165-89957-2003.doc
- http://www.mma.es/secciones/biodiversidad/montes_politica_forestal/restauracion_monte/caracteristicas/correccion_cauces.htm (FOTOS DIQUES)
- http://www.treehugger.com/files/2008/01/sydneys_rainwat.php
- http://hispagua.cedex.es/documentacion/documentos/l_b/cap3_m.pdf
- http://www.scielo.org.pe/pdf/iigeo/v7n13/a09v7n13.pdf
- http://www.agua-dulce.org/htm/experiencias/experiencias.asp?ID=23
- http://www.cepis.ops-oms.org/bvsacd/cd47/lluvia.pdf
- http://aguas.igme.es/igme/publica/lib_mvalle/pg159.pdf
- http://jacinta.palerm.googlepages.com/ICA_51_equihua.pdf
- http://www.agnet.org/library/eb/448/
- http://www.almediam.org/Aprovechamiento%20hidraulico%20Nijar/Aguanijar_005.htm
- http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=143
- http://servicios.laverdad.es/murcia_agua/

CAPÍTULO 3. GESTIÓN FORESTAL Y AGUA

RECARGA ARTIFICIAL EN ZONAS DE CABECERA DE CUENCA Y ÁREAS FORESTALES: TÉCNICAS DE GESTIÓN FORESTAL PARA LA PRODUCCIÓN DE AGUA. EJEMPLO EN LA COMUNIDAD VALENCIANA. Por Juan Carlos Delgado Sánchez.

Este apartado ha sido elaborado por el Ingeniero de Montes Juan Carlos Delgado Sánchez y revisado por Carlos Copano González de Heredia.

ANTECEDENTES

Actualmente el gran desarrollo urbanístico en la costa levantina está afectando directamente a la cantidad y calidad de las reservas de agua subterránea. Una alternativa en las zonas costeras es la desalación, pero es necesario encontrar una solución para las áreas del interior. El manejo y gestión del agua de escorrentía de los montes, que constituye la principal fuente de recarga de los acuíferos, debe formar parte de las medidas paliativas de este fenómeno.

MANEJO DEL AGUA DE ESCORRENTÍA

Cuando el terreno se satura y no retiene el agua de lluvia, ésta se mueve a favor de la gravedad hacia los cauces, va incrementando su volumen y capacidad de arrastre y puede llegar a causar graves daños a bienes y personas, así como la pérdida de de gran cantidad de recursos hídricos. Una adecuada gestión del monte puede enviar gran parte de esta agua hacia los acuíferos. A continuación se describen dos ejemplos de manejo del agua de escorrentía.

Charca y depósito regulador de la sierra del Maigmó (Petrer)

Sobre una superficie arcillosa compactada de 3.000 m^2 se dirige el agua de lluvia mediante caballones hacia una canalización, de ahí a un decantador, para finalizar en un depósito subterráneo que alimenta una laguna de 350 m^2.

De esta manera, con una precipitación media anual de 350 mm, cada metro cuadrado produce 266,66 litros/año.

Suponiendo un coeficiente de escorrentía de 0,76 y un área de captación de 3 ha se podría obtener una cantidad anual de 8 millones de litros, suficiente para proporcionar 200 litros/persona/día para una población de 110 personas.

Este tipo de acciones en el monte fomenta de forma notable la diversidad faunística, frecuentemente limitada por la falta de agua.

El manejo de aguas turbias en el sudeste español

Se basa en desviar cursos de agua de arrollada controlables para poder regar los predios colindantes.

La técnica se diseñó en la época romana, y fue posteriormente desarrollada por los árabes. Un ejemplo de utilización de esta técnica se encuentra en el barranco de Agost, donde en la época de máximo esplendor llegaron a regarse 1.800 ha con esta técnica.

LA GESTIÓN FORESTAL

La gestión estaría dirigida a la recolección de agua, tanto para la recarga de acuíferos como de depósitos.

Control de cárcavas y de aguas de arroyada

El agua de escorrentía es manejable siempre y cuando sus dimensiones sean tolerables. Es el caso de las cárcavas. Además, los grandes cauces se alimentan de infinidad de cárcavas, por lo tanto, con un control microhidrológico de las cárcavas se podría reducir el caudal de las avenidas.

Una de las técnicas es la construcción de pequeñas presas, que embalsan el agua favoreciendo la infiltración. El inconveniente es que pos poros quedan rápidamente obturados por la deposición de finos. El mismo efecto tiene la construcción de azudes de tierra, rastrillos de madera o algarrabas, de mampostería o madera.

Otra de las ventajas de estas acciones es el efecto positivo que ejerce sobre la vegetación.

Restauración de abancalamientos

El abandono de os bancales (excelentes obras de corrección hidrológica) está causando su acarcavamiento y deterioro. Como medida correctora se utiliza la reforestación con especies edificadoras, que contribuyen a la mejora de la capacidad de infiltración.

Las especies más utilizadas son la coscoja, por su porte pegado, y el pino ssp, que debe plantarse guardando marcos de 4 x 4 m y mezclarse con otras especies de interés. Se busca una vegetación diversa con alto nivel protector, cuya mezcla origine estratos.

Selvicultura para la producción de agua

Estaría justificada en montes de especial interés para la recarga de acuíferos. Los criterios de aplicación son:

-Masas diversas en especies y estratos, con importante recubrimiento del terreno, para proporcionar cobertura al suelo (imprescindible para la infiltración).

-En los pinares favorecer el crecimiento de árboles grandes que enriquezcan el terreno con sus restos. Deben ser masas abiertas que permitan la entrada de luz para el crecimiento del estrato arbustivo.

-Se favorecerá a las especies de alto valor protector y edificador, eliminando a las que supongan competencia.

MONTES ORDENADOS PARA LA GESTIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS

Esta técnica se aplica en Suiza. Consiste en desviar parte del cauce de un río hacia el interior de un bosque ordenado para la recarga, esto es, en tramos. Cada año se riega por inundación un tramo, lo que favorece el desarrollo de suelos radiculares.

DIQUES FORESTALES PARA LA GESTIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS

El problema que presenta esta técnica es la colmatación de finos, por esa razón deben ubicarse en sedimentos muy permeables y con buen estado de conservación de los suelos del entorno.

Es aconsejable colocar previamente pequeños diques que cumplan la función decantadora y prevenir el arrastre de finos con repoblaciones u otras correcciones.

DISEÑO DE PROYECTOS DE MANEJO DE AGUA DE ESCORRENTÍA PARA SU USO COMO AGUA POTABLE O PARA RIEGO

Entre las distintas opciones consideradas, se plantean cuatro posibilidades:

1. Recogida de agua por impermeabilización de superficies.

2. Derivación de pequeños cauces. Después el agua se hace pasar por un dispositivo de decantación (balsas, albarradas, etc.) hasta una canalización. De ahí a un decantador y por último a un depósito o balsa.

3. Pequeñas presas en cauces fluviales, a modo de pequeños embalses.

4. Zanjas de recogida de agua a pie de ladera, en laderas rocosas donde es difícil el arrastre de finos. De ahí a un decantador y por último a un depósito o balsa.

En definitiva, la gestión forestal puede ser considerada una técnica de gestión hídrica paliativa, en tanto que incrementa la reserva en los acuíferos desde las divisorias y las cabeceras de las distintas subcuencas, que pasan a formar parte del circuito subterráneo de las aguas.

Gran parte de estos aspectos son desarrollados con mayor detalle en el artículo siguiente.

TÉCNICAS PALIATIVAS DE GESTIÓN HÍDRICA. EL INCREMENTO DE LA RESERVA MEDIANTE LA GESTIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN ÁREAS FORESTALES. Por Carlos Copano González De Heredia, Enrique Fernández Escalante y Mª Jesús Minaya Ovejero.

A continuación se presenta y describe algunos sistemas, basados en técnicas de recarga artificial, para incrementar la infiltración del agua en la cabecera de las cuencas, con objeto de aumentar la reserva en los acuíferos. Así mismo analiza cómo las masas forestales inciden en la infiltración, concluyendo en su efecto positivo: Los bosques fomentan la recarga de sus acuíferos subyacentes.

INTRODUCCIÓN

Un tema bastante controvertido hasta la fecha en escenarios hidráulicos es si la vegetación resta agua a los acuíferos o, si por el contrario, incrementa las reservas en la cabecera de las cuencas.

En este contexto, uno de los múltiples objetivos de la gestión forestal es el adecuado manejo del monte, de modo que la mayor fracción posible del agua de escorrentía se infiltre, aumentando las reservas de los acuíferos.

Los beneficios que las masas forestales arboladas ejercen sobre el ciclo hidrológico se deben fundamentalmente a la influencia que éstas tienen sobre el clima, el agua y el suelo (López, 1992). Su importancia es tal que la Carta del Agua del Consejo de Europa (1972) llega a afirmar: “el mantenimiento de la cubierta vegetal adecuada, preferentemente forestal, es esencial para la conservación de los recursos hídricos”.

El principal objetivo en este apartado es aportar elementos de juicio, que reduzcan la controversia mencionada, así como describir y analizar los dispositivos hidráulicos que pueden ser empleados en el fomento de la gestión hídrica paliativa. Se trata de un tema pluridisciplinar con gran escasez de antecedentes bibliográficos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para poder desarrollar el presente apartado, se ha partido de datos reales de balances hídricos realizados en áreas forestales, en general en el ámbito de la Comunidad Valenciana y Arco Mediterráneo. Se ha concedido especial atención a las zonas de cabecera de cuenca con presencia de diques de retención y dispositivos de regulación y laminación de las aguas de escorrentía (COPUT, 1994, 1996).

Las subcuencas estudiadas y sus correspondientes datos se encuentran en las referencias mencionadas en la bibliografía.

Además de los balances hídricos, se ha analizado la variación de la reserva de agua mediante la observación de piezómetros ubicados en las subcuencas estudiadas ubicadas sobre acuíferos bien caracterizados y suficientemente conocidos (CMA, 1994, 1996).

Los datos de piezometría se han obtenido de la Red Rocas del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y de la Confederación Hidrográfica del Júcar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En líneas generales, las salidas que se producen en el sistema por causa del aumento de la transpiración y la intercepción, como consecuencia de la mejora de las masas forestales, quedan compensadas con la disminución de las pérdidas por evaporación directa del agua del suelo.

Esta compensación aparece justificada en la mayoría de los modelos matemáticos consultados en los antecedentes (Gandullo, 1992, Schwab, *et al.*, 1966 y Dunne, 1978), al considerarse que la energía solar empleada en el proceso es la misma, independientemente del tipo de vegetación existente, y que dicha radiación se emplea en el proceso global de la evapotranspiración, por lo que la altura final de agua evapotranspirada es muy similar de unos casos a otros.

A partir de los datos analizados relativos a los distintos elementos del balance hídrico se ha elaborado un cuadro con carácter matricial (relaciona factores con procesos), generando una serie de efectos con peso sobre aquellos factores que sirven de base para la propuesta de dispositivos relacionados con la gestión hídrica paliativa.

En la Tabla 3-01 se resumen los distintos beneficios que las masas forestales arboladas producen sobre los principales factores que determinan el balance hídrico de una subcuenca determinada: El clima, el agua y el suelo (Pérez-Soba, 1985).

A continuación se describen algunas actuaciones de gestión forestal que es posible acometer, con objeto de incrementar las reservas hidráulicas más relacionadas con la influencia de las masas forestales, con objeto de paliar la escasez o problemas de sequía en zonas más bajas de las cuencas hidrográficas si el acuífero es el mismo.

Repoblaciones y selvicultura para la recarga artificial en profundidad

Estaría justificada en zonas proclives para la recarga de acuíferos. Los criterios de aplicación son:

- Creación de masas pluriespecíficas y con numerosos estratos, que permitan un importante recubrimiento del terreno y una abundante densidad de raíces en el suelo (todo ello imprescindible para una mejor infiltración).
- Favorecer a las especies de alto valor edáfico y bajo consumo de agua, eliminando a las hidrófilas.

- Potenciar las especies con sistemas radicales adaptados a las condiciones edáficas y de recarga del acuífero correspondiente.

Preparación mecanizada del suelo para favorecer la infiltración

En determinadas zonas forestales, en aquellas superficies directamente asentadas sobre zonas de recarga artificial de acuíferos (http://www.dina-mar.es), se pueden realizar labores de preparación del suelo, tales como subsolados según curvas de nivel, que permitan alcanzar los siguientes objetivos:

- Crear surcos que favorezcan la infiltración.
- Disminuir la escorrentía superficial.
- Facilitar la implantación y desarrollo de las plantas.

Todo ello permite una mayor eficacia en el aprovechamiento del agua, aumentando la infiltración y mejorando la recarga del acuífero existente.

Figuras 3-01. a) y b). La realización de surcos o zanjas de contorno, además de reducir significativamente la erosión hídrica aumentan el tiempo de permanencia del agua en la ladera, favoreciendo la infiltración natural, la recarga de los acuíferos y el mejor desarrollo de la posterior plantación.

Montes ordenados para la recarga de acuíferos

Es una técnica que se está aplicando en Suiza con buenos resultados. Consiste en desviar parte de las aguas de un río hacia el interior de un bosque ordenado para la recarga, esto es, en tramos o rodales, regando cada año por inundación uno de los tramos (FAO; 1962). El empleo de especies con adecuados sistemas radicales y la realización de determinadas labores en el suelo, permite una mejor infiltración y, en consecuencia, una mayor recarga de los acuíferos existentes bajo esa masa arbolada.

Restauración y mantenimiento de bancales

Los bancales son rellanos artificiales, de forma más o menos rectangular, que interrumpen la pendiente de un terreno, favoreciendo su disponibilidad para el cultivo. Estas infraestructuras han sido usadas desde antiguo y han permitido al hombre

extender sus áreas cultivadas a zonas difícilmente aprovechables sin esta técnica, siendo unas obras de control hidrológico muy eficaces.

En las últimas décadas, gran parte de los bancales se han abandonado, lo que ha generado su deterioro y el incremento de la escorrentía superficial, que antes estaba controlada (CAM; 1994). Una labor que puede recuperarlos y hacer que vuelvan a desempeñar ese papel de zonas de infiltración, es su repoblación con especies forestales.

Figura 3-02 Ladera abancalada. Gran cantidad de estas magníficas obras de corrección, están hoy día abandonadas. Su mantenimiento y repoblación forestal facilitan un mejor aprovechamiento hídrico de las aguas de escorrentía. Zona de Morella (Castellón).

Las especies a utilizar dependen de la zona climática en donde se encuentren los bancales, pero se suele buscar una vegetación diversa, con alto nivel protector y con mezcla de estratos. En las zonas mediterráneas, que es donde se presentan estas estructuras con mayor abundancia, se suelen emplear: pino carrasco *(Pinus halepensis)*, algarrobo, acebuche, encina, fresno, coscoja, etc. Deben plantarse con marcos amplios (4 x 4) o al tresbolillo.

Aprovechamiento de las aguas de escorrentía

Una de las actuaciones más comúnmente utilizadas en los trabajos de corrección hidrológico-forestal, es la ejecución de diques y albarradas en los barrancos y cauces. Dichas obras, si bien se construyen normalmente con otros fines (laminación, retenida, consolidación), pueden, según los casos, servir también como infraestructuras para embalsar las aguas. Las aguas así embalsadas, reducen su velocidad aumentando el tiempo de permanencia en la cuenca y favoreciendo la infiltración natural. Si esos diques se ubican en zonas permeables que además sean superficies de recarga de un acuífero, se estará potenciando su recarga (F. Escalante, 2009).

El inconveniente que tiene este sistema de recarga es que los sedimentos que transportan las aguas pueden taponar los poros del suelo por donde se infiltra el agua, perdiendo parte de su eficacia. Para solucionar este problema se debe realizar una reforestación de la cuenca vertiente y puede llegar a ser necesaria la instalación de

varios diques de retenida en serie, para favorecer la sedimentación previa al proceso de infiltración, prolongando la vida útil de estos dispositivos (Bureau, 1981).

Figura 3-03. Dique en un torrente de Sierra Nevada (Granada). Laminan el caudal punta y aumentan la infiltración natural.

Otra de las ventajas de este tipo de obras es el efecto positivo que ejercen sobre la vegetación, ya que producen un incremento de las disponibilidades hídricas en el entorno, permitiendo el desarrollo de un ecosistema más diverso y valioso, tanto a nivel de la flora como de la fauna.

Figuras 3-04. a) y b). Dique en el torrente Salado (Lanjarón, Granada) en el momento de su construcción, década de 1950, y en la actualidad. La presencia del dique ha favorecido el desarrollo de un ecosistema muy valioso (las flechas en rojo señalan el mismo elemento en ambas fotos).

Además de estas obras, existen otras actuaciones que también contribuyen a un uso más adecuado de las aguas de escorrentía y al incremento de su disponibilidad superficial y subterránea, entre las que cabe destacar.

Recogida de agua por impermeabilización de superficies

La impermeabilización de cunetas o de zanjas de drenaje, permite recoger y conducir parte de las aguas de escorrentía hacia depósitos de almacenamiento (como los empleados en los incendios forestales), lo que genera un mayor aprovechamiento de las mismas (Ponce, 1989).

Figura 3-05. Zanja de drenaje en una ladera. La recolección del agua de lluvia, reduce la erosión y permite un mayor a aprovechamiento de la escorrentía. Navarra.

Pequeñas presas en cauces fluviales, a modo de pequeños embalses

De ahí, por infiltración, el agua irá aumentando el suministro de los acuíferos.

Figura 3-06. Pequeña presa para embalsar agua, P.N. de Cabañeros (Ciudad Real).

Balsas de recogida de agua a pie de ladera

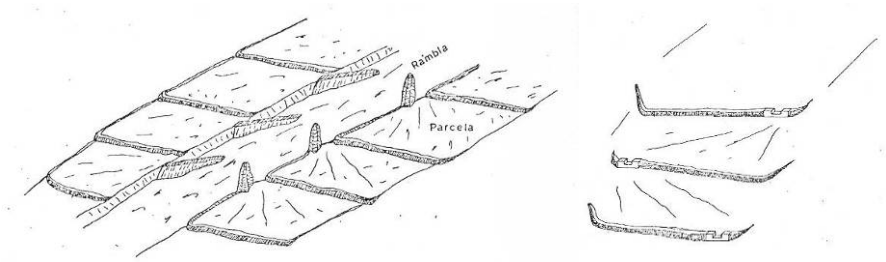
Su utilidad es múltiple bebedero para la fauna, para defensa de incendios, para infiltración en profundidad, para riego de plantas, etc.

Boqueras

Son unos largos caballones que derivan parte del caudal durante una avenida y lo conducen hacia las parcelas de cultivos, su uso es muy común en las ramblas (Fig. 7a).

Atochadas

Consisten en represar el agua de escorrentía por medio de caballones de tierra, transversales a la vaguada, y que disponen de aliviaderos laterales para permitir el paso de una a otra atochada (Fig. 7b).



Figuras 3-07 a) y b). a) Croquis de boqueras en una rambla. (Tomado de Ecología Fuera de Serie. ICONA. 1990) y b). Croquis de atochadas. Las líneas marcan el recorrido de las aguas (Tomado de "Ecología Fuera de Serie". ICONA. 1990).

Además, las formaciones boscosas, y su correcta gestión, ejercen otra serie de influencias positivas sobre las aguas, tanto subterráneas como superficiales, tales como:

- Mayor aumento de la calidad de las aguas, lo que a su vez supone menores costes de depuración y mayor garantía sanitaria.
- Conservación de ecosistemas húmedos (zonas húmedas, manantiales, ríos, etc.), lo que conlleva un beneficio ecológico y de conservación de la biodiversidad, un impedimento a la intrusión marina y otros problemas de contaminación y un mantenimiento del paisaje, y por ende, un mayor valor recreativo y cultural.

CONCLUSIONES

Las técnicas paliativas de gestión hídrica basadas en la recarga en áreas forestales y de cabecera de cuenca estudiadas hasta la fecha están arrojando muy buenos resultados, puesto que permiten disponer de un volumen de aguas subterráneas

importante en las “cabeceras” de los acuíferos, a la vez que ayudan a reducir el efecto devastador de avenidas, etc.

El dispositivo más adecuado en estos contextos son los diques, que incrementan las reservas en los acuíferos de manera considerable.

La mayor parte de la recarga artificial en España es de tipo accidental. Conforme a estimaciones de DINA-MAR, el volumen infiltrado en cada anualidad, gracias a las técnicas de gestión forestal para la producción de agua (especialmente por diques situados en las cabeceras de cuenca) incrementa en unos 300 hm^3 el volumen infiltrado gracias a los dispositivos inventariados y presentados en el capítulo 2.

Según se ha constatado en el Este de España a partir de estudios con datos climáticos y de infiltración de cinco años de duración en dos zonas puntuales, los bosques han permitido la infiltración de un volumen de agua cercano al 20% más en el subsuelo que en las áreas deforestadas. Esta estimación parte de reseñas bibliográficas (Conselleria D’obres Publiques, Urbanisme i Transports, 1994 y Conselleria de Agricultura y Medio Ambiente e Instituto Tecnológico Geominero de España, 1996) y han sido contrastadas mediante un SIG y datos del SIMPA en dos subcuencas bien estudiadas.

La realización de estas infraestructuras seriadas en las cabeceras de cuencas y a lo largo de los cauces, así como la reforestación de áreas de recarga y su gestión adecuada, suponen un incremento en la recarga de los acuíferos.

Igualmente, esa gestión forestal favorece una mayor calidad de las aguas y el mantenimiento o aparición de ecosistemas con mayor calidad ambiental.

Se remite al lector interesado a las memorias de las distintas anualidades para ampliar esta información.

ELEMENTO DEL BALANCE	PROCESO	EFECTO	INFLUENCIA SOBRE
CLIMA	Luminosidad	Cualitativamente: disminuye las longitudes de onda rojas y azules (las frondosas). Cuantitativamente: reduce la luminosidad entre un 5-20%.	Balance de radiación Evapotranspiración
	Temperatura	Reduce las temperaturas extremas. Mantiene las medias de los meses fríos y disminuye las medias de los meses cálidos. Disminuye la media anual en unos 4ºC	Evapotranspiración Humedad relativa
	Viento	Reduce la velocidad a 1/4 ó 1/5 de la del raso.	Evapotranspiración Humedad relativa
	Humedad relativa	Aumenta en un 10% como media (por menor temperatura y mayor dificultad de difusión del vapor de agua, entre otras cosas).	Evapotranspiración
	Precipitacio-	En las ciclónicas no influye. En las	Disponibilidades

ELEMENTO DEL BALANCE	PROCESO	EFECTO	INFLUENCIA SOBRE
	nes	convectivas tiene una ligera influencia, si bien está poco precisada. En las orográficas las incrementa, de forma que aumenta las precipitaciones totales entre un 2-3%. Incrementa el agua captada por las precipitaciones no convencionales tales como el rocío, la escarcha, las precipitaciones ocultas y las precipitaciones horizontales (estas últimas son especialmente importantes en bosques de zonas sometidas a vientos marítimos). Intercepción: las masas forestales captan parte de la lluvia originando unas pérdidas respecto del agua que alcanza el suelo. Dicha intercepción se valora en un 30% de las precipitaciones para las coníferas, entre 15-20% para las frondosas, y cantidades inferiores para matorrales y pastos; la cubierta en contacto con el suelo también produce una intercepción importante, dependiendo de su espesor y composición. El agua interceptada termina por evaporarse, contribuyendo así al proceso de evapotranspiración del sistema.	hídricas Evapotranspiración Balance de radiación
AGUA	Escorrentía	Disminuye al conjugarse la mayor capacidad de infiltración que producen; la intercepción que generan; la mayor rugosidad de la superficie del suelo y los mayores obstáculos que interpone, lo que produce una fuerte disminución de la velocidad del escurrimiento, que a su vez influye en la disminución del caudal punta y en la pérdida de volumen por mayor infiltración y evaporación debido al retraso; la transpiración de las plantas, que regula la humedad del suelo y mantiene una cierta reserva aún en épocas húmedas; y por la gran capacidad de absorción que tiene la cubierta de restos vegetales y humus de las masas forestales.	Caudales punta Disponibilidades hídricas Infiltración Evapotranspiración

ELEMENTO DEL BALANCE	PROCESO	EFECTO	INFLUENCIA SOBRE
	Evapotrans-piración	Además de su influencia en los elementos climáticos que la regulan, las masas forestales intervienen en el balance de la evapotranspiración a través de la composición de las masas (especies que las configuran), de la densidad de las mismas y de la edad de sus individuos, fundamentalmente.	Evapotranspiración
	Calidad	Producen una disminución de sedimentos; introducen menos carga de nutrientes en las aguas que drenan (nitrógeno y fósforo principalmente), reduce la concentración de nitratos en el agua tan difícil de corregir en las plantas de tratamiento; disminuye la temperatura de las aguas, lo que propicia un mayor contenido de oxígeno y una mayor capacidad depuradora; regulando además las oscilaciones bruscas de la temperatura de las aguas.	Disponibilidades hídricas Mantenimiento y equilibrio de los ecosistemas
SUELO	Infiltración	Modifican la capacidad de infiltración de un suelo mediante: la intercepción inicial de las gotas de lluvia, que retarda su llegada al suelo disminuyendo su intensidad; el escurrimiento de agua a lo largo del tronco, que se incorpora en su mayoría al suelo; la gran capacidad de absorción de las cubiertas de restos vegetales y húmicas, retrasando el punto de encharcamiento; la mayor porosidad de que dotan a los suelos forestales los sistemas radicales y la materia orgánica incorporada, que establecen una permeabilidad superior a la de cualquier otra cubierta vegetal; y, finalmente, un incremento de la propia capacidad de absorción de agua por el suelo, consecuencia de su modificación estructural debida al arbolado.	ecarga de la apacidad de campo umento de las eservas de aguas ubterráneas

Tabla 1: Matriz para el análisis de los beneficios de las masas forestales arboladas sobre los elementos del ciclo hidrológico.

BIBLIOGRAFÍA

- BUREAU OF RECLAMATION (1981). "Diseño de presas pequeñas". CECSA. México.
- CONSELLERIA D'AGRICULTURA, PESCA I ALIMENTACIÓN. "Plan de modernización del regadío en la Comunidad Valenciana". Generalitat Valenciana.
- CONSELLERIA D'OBRES PUBLIQUES URBANISME I TRANSPORTS (1985). "Libro Blanco del Agua en la Comunidad Valenciana". Generalitat Valenciana.
- CONSELLERIA D'OBRES PUBLIQUES, URBANISME I TRANSPORTS (1994). "Bases para la política hidráulica en la Comunidad Valenciana". Direcció General d'Obres Públiques. Generalitat Valenciana.
- CONSELLERIA DE AGRICULTURA Y MEDIO AMBIENTE E INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA (1996). "Los recursos hídricos en la Comunidad Valenciana". Madrid.
- CONSELLERIA DE MEDI AMBIENT (1994). "Libro Blanco de la Política Forestal de la Comunidad Valenciana". Generalitat Valenciana.
- Dunne, T. y Leopold, L.B. (1978). "Water in Environmental Planning". W.H. Freeman and Company. New York.
- FAO (1962). "La influencia de los montes". Roma.
- Fdez. Escalante, E. (2009). "Gestión de la recarga de acuíferos (MAR)". Serie Hidrogeología Hoy, nº Grafinat. 2ª Edición.
- Gandullo, J. M. (1992). "Influencias de la vegetación en el clima". Curso Internacional sobre Ordenación Agrohidrológica y Restauración Hidrológico-Forestal de Cuencas. CENEAN. España.
- López Cadenas de Llano, F. (1992). "Influencia de la vegetación en la conservación del agua y del suelo". Curso Internacional sobre Ordenación Agrohidrológica y Restauración Hidrológico-Forestal de Cuencas. CENEAM. España.
- Pérez-Soba Baró, A. (1985). "Influencias de la vegetación en la conservación del suelo y del agua". Revista El Campo nº 98: Bosques y montes de España.
- Ponce, V. M. (1989). "Engineering hydrology. Principles and practices". Prentice Hall. New Jersey.
- Schwab, G. O. Frevert, R. K, Edminster, T. W. y Barnes, K. K. (1966). "Soil and water conservation engineering. Chapter 3: Infiltration, Evaporation and transpiration". Third Edition.

CAPÍTULO 4. MEDIO AMBIENTE Y MAR

DIMENSIÓN MEDIOAMBIENTAL DE LA TÉCNICA MAR. EFECTOS, CONDICIONANTES E INDICADORES AMBIENTALES DE LA RECARGA ARTIFICIAL. Por Jon San Sebastián Sauto y José Mª García Asensio.

RESUMEN

En este capítulo se han aglutinado dos líneas de acción diferentes del proyecto; por un lado la relativa a los condicionantes y aspectos a tener en cuenta en los estudios de impacto ambiental, y por otro los indicadores medioambientales específicos. Ha sido redactado por el Dr. en CC. Biológicas Jon San Sebastián y el Dr. Ingeniero Agrónomo y ambientólogo José Mª García.

INTRODUCCIÓN

Este capítulo pretende establecer un método de planificación ambiental que sirvan para seleccionar zonas potenciales o discriminar áreas con limitaciones de instalación de dispositivos MAR, así como establecer indicadores de seguimiento. Se han analizado los tipos de dispositivos, fases de obras y factores del medio. Las leyendas de cartografías administrativas, hidrológicas, hidrogeológicas, botánicas, zoológicas, ecológicas y de usos han sido reinterpretadas con un enfoque ambiental y se ha realizado un ejemplo con la capa CORINE. De dicha aplicación se han obtenido 6 grupos de criterios ambientales básicos para la aplicación de MAR: Fuentes de contaminación, riesgos, condicionantes, demandas, tendencias y ventajas. Así mismo, se propone una serie de indicadores para evaluar el seguimiento de este tipo de actuaciones.

OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo se enmarcan en el análisis de la recarga desde el punto de vista del medio ambiente. Para ello se proponen un par de tareas principales:

- Se analizarán sus posibles efectos ambientales.
- Se plantearán sus condicionantes y sus ventajas.

Para la consecución de estas metas se establece una serie de puntos a analizar:

- El actual marco legal, ceñido al ámbito de la EIA fundamentalmente.
- Desglose de las acciones dentro de los diferentes métodos de recarga para

relacionarlos con los componentes principales del medio físico, natural y humano.
- El análisis de efectos y limitaciones se realizará en paralelo.
- Estudio pormenorizado de cada una de las cartografías disponibles a nivel nacional para poder aplicar en cada una la condicionalidad y las posibles consecuencias ambientales.
- Establecimiento de indicadores de seguimiento de las actuaciones de recarga artificial.

MATERIALES Y FUENTES DE INFORMACIÓN

Las principales fuentes de información son:

- BDB. Banco de Datos de la Biodiversidad, Ministerio de Medio Ambiente.
- CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
- Elaboración propia: Realizado en TRAGSATEC.
- ESRI. Environmental Systems Research Institute, Inc.
- IGME: Instituto Geológico y Minero de España.
- IGN: Instituto geográfico Nacional.
- INE: Instituto Nacional de estadística.
- MAPA: Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación (actual MARM).
- MMA: Ministerio de Medio Ambiente (actual MARM).

Las fuentes de información ambiental son de dos tipos:

- Bases de datos sin georreferenciar.
- Capas temáticas georreferenciadas que permitirán realizar cruces o intersecciones.

El hecho de que no toda la información pueda ser subdividida, por problemas de origen de los datos, hace que no sea siempre posible realizar agrupaciones o subdivisiones dentro de la misma categoría, y menos aún cruces entre categorías diferentes.

METODOLOGÍA

- Reestructurar los contenidos de las bases de datos asociadas a cartografía de forma que se reordenen según criterios ambientales.
- Añadir etiquetas o campos de interés ambiental a las capas para detectar zonas de interés para la recarga o valorar su viabilidad ambiental.
- Crear capas nuevas de interpretación ambiental.
- Reconvertir otras, como por ejemplo: transformar la red ICA de aguas subterráneas en una nube de puntos de límites para uso de fuentes de recarga o, por el contrario, de localización de zonas preferentes para realizar recarga de mejora de calidad a partir de otras fuentes.
- Reinterpretar las leyendas de las capas temáticas y las bases de datos existentes a nivel estatal para establecer la relación entre la recarga artificial y sus efectos ecológicos.
- Preevaluar ambientalmente la recarga a nivel estatal, considerando tanto los lugares donde ya se ha puesto en marcha como los que potencialmente presenten

mayores ventajas frente a sus posibles limitaciones.

ACCIONES Y EFECTOS DE LA TÉCNICA MAR

Para conocer los posibles efectos ambientales de la recarga es preciso analizar las acciones comunes a los sistemas de gestión de la recarga o sistemas MAR, pero también los diferentes dispositivos usados. Según la tecnología elegida los efectos ambientales pueden variar en cuanto al factor o factores afectados y el sentido del impacto. También se contemplarán los requisitos ambientales de cada grupo de sistemas de recarga artificial.

Factores del medio

- Atmósfera
- Aguas subterráneas
- Aguas superficiales
- Suelo
- Vegetación
- Fauna
- Relaciones ecológicas
- Paisaje
- Patrimonio
- Socioeconomía

Acciones por fases

DISEÑO: En esta fase la incorporación de medidas preventivas clave para evitar los impactos más dañinos, conforme a:

- Elección de objetivos de la recarga artificial.
- Selección de la UH a recargar.
- Elección de la fuente de agua de recarga.
- Tipos de dispositivos MAR.
- Localización de punto(s) de recarga.
- Diseño del plan de captación/recarga/extracción.

CONSTRUCCIÓN: Durante esta fase se ponen en marcha los efectos temporales pero también se hacen realidad los diseños que determinarán la forma de recarga y sus posibles riesgos y medidas correctoras asociados.

EXPLOTACIÓN: Una vez establecidos los dispositivos, la gestión de la recarga puede fomentar o evitar diversos fenómenos como avenidas o desecaciones. Algunos aspectos destacables a tener en cuanta son:

- Presencia de infraestructuras
- Captación de agua
- Transporte
- Almacenamiento

- Pretratamiento
- Infiltración
- Inyección
- Almacén subterráneo
- Extracción
- Postratamiento
- Distribución
- Uso
- Vertido

Efectos por método

Las principales tipologías de sistemas de Gestión de la Recarga de Acuíferos, a tener en consideración para los estudios del medio ambiente son:

MÉTODOS EXTENSIVOS: La filtración a través del subsuelo puede provocar autodepuración con mejora de la calidad según la profundidad del freático y la tipología del suelo, pero también colmatación de los poros del subsuelo o contaminación inducida por contacto con contaminantes preexistentes del suelo.

MODIFICACIONES DENTRO DEL CANAL: Ocupan gran superficie y suponen riesgo de eutrofización, aparte de generar posibles cambios geomorfológicos del cauce que den lugar a efectos hidrológicos secundarios. Pueden también generar hábitats de interés piscícola o para avifauna acuática.

RECARGA POR POZOS, MINAS Y SONDEOS. Implican la necesidad de buena calidad aportante o, al menos, mejor que la calidad de la masa de agua receptora y suponen un cierto riesgo para los vertidos contaminantes por su accesibilidad o para el lavado de contaminantes por lixiviado por restos de vetas o por escorias acumuladas.

INFILTRACIÓN INDUCIDA: Tienen efectos directos en los medios al lado de los que se instalan. La infiltración en un punto de la red puede afectar a surgencias y/o desecaciones aguas abajo de la red hidrológica.

RECOLECCIÓN DE AGUA DE LLUVIA. La forma de recolectar puede variar mucho su calidad al incluir desde tomas directas en techos o jardines con bajo riesgo hasta el almacenamiento de aguas negras tras su paso por puntos urbanos de alta contaminación.

RESULTADOS Y COMENTARIO

División administrativa

El análisis de la división administrativa permitirá obtener una serie de condicionantes ambientales relacionados con las bases de datos con información habitualmente no georreferenciable al hacer alusión a datos agrupados de muy diversas fuentes y muchas veces difíciles de rastrear hasta su punto de origen:

EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA)

La diferente aplicación a nivel estatal y de las 17 CCAA permitirá detectar según el ámbito del proyecto, programa o plan de recarga artificial una serie de requisitos por nivel, tipo, umbral de aplicación y condicionantes.

NIVEL DE EIA: La EIA se aplica según cada Administración competente, por lo cual varía a lo largo tanto del territorio como del ámbito competencial vigente.

TIPOS DE EIA: Estratégica, EIA obligatoria, Caso a caso, Informe ambiental y Calificación Ambiental. Esta división afecta al nivel del proyecto dentro de la planificación sectorial, pero también al ámbito estatal hasta local.

UMBRALES DE APLICACIÓN: Estas tipologías están a su vez asociadas a unos límites establecidos determinados o a unos criterios a considerar. La asociación de bases de datos permitirá averiguar según la localización de una recarga en una o varias CCAA la aplicación del supuesto correcto, tanto por su ámbito como también por características técnicas del proyecto.

CONDICIONANTES DE EIA: Los diferentes niveles de exigencia hacen preciso relacionar dentro de cada ámbito administrativo los datos necesarios para saber el nivel de EIA aplicable. Estas condiciones implican a su vez realizar cartografías derivadas (a partir de las existentes de RN2000, cuencas, UH, piezometrías y caudales, etc.) de áreas o puntos que superen los criterios establecidos legalmente. Elementos a tener en cuenta en la cartografía son:

- Coincidencia con espacio de la red Natura 2000.
- Captación de superficiales o subterráneas.
- Volumen de agua extraída/recargada anualmente (10; 7; 1,5; 1; 0,1 Mm^3/año, 20.000-7.000 m^3/año, 5 m^3/hora).
- Profundidad del sondeo (mayor o menor de 300 m).
- Relación directa con humedales conspicuos o nivel subsuperficial de criptohumedales (Ramsar y humedales).
- Uso para abastecimiento.
- % de recarga anual.
- % caudales de estiaje de sus cursos.
- Cuenca hidrográfica afectada.
- UH afectada.

División hidrológica

Las cuencas y subcuencas permitirán en primer lugar definir aportes potenciales y también localizar dentro de ellas los lugares que según otras capas temáticas puedan suponer un riesgo común a un dispositivo de recarga artificial.

CUENCAS: Los datos aportados por las CH permitirán establecer necesidades según el plan de cuenca. La aplicación de la DMA también permitiría capturar información, aún en fase de elaboración en la mayoría de ellas, sobre:

- Impactos y riesgos potenciales por tramos.
- Medidas en las que la recarga puede jugar un papel importante.
- Conectividad entre cuencas, tramos y puntos según usos aguas abajo y aguas arriba.

ÁREAS DE RIEGO: Establecen zonas homogéneas de origen de las aguas usadas para regadío y el sistema y origen dominante de riego. Esto genera dos tipos de información:

- Tendencia de las demandas hidráulicas para el uso que mayor consumo realiza en España.
- Posibilidades de obtener un caudal de retorno o un riesgo de polución cuando el sistema es gravedad.
- Ríos: Con la capa de tramos de río se pueden generar diferentes tipos de información:
  - Proximidad a punto de origen de aguas para definir necesidades de transporte para la recarga.
  - Situación de embalses para su uso secundario como sistema MAR.
  - Localización de puntos de carga/descarga natural de las UH recargables.
  - Calidad exigible por tramos para diferentes usos según Plan de Cuenca.
- Red ICA superficial: Puntos dentro de la red de aguas superficiales que implican:
  - Calidad del agua como recurso para la recarga artificial.
  - Calidad del agua como limitante para su uso en recarga artificial.

División hidrogeológica

Evidentemente bajo este epígrafe encontraremos las capas de mayor relevancia para este trabajo: En algunos casos será necesario vincular bases de datos a polígonos de cartografía ya que no toda la información está georreferenciada originalmente o tiene representación cartográfica ajustada.

UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS: Fundamental para aportar información clave para detectar necesidades y limitaciones:

- Tipología geológica para la infiltración y filtrado.
- Nivel piezométrico para la autodepuración y coste de bombeo/infiltración.
- Zona de recarga y compartimentación.
- Calidad química de las aguas subterráneas.
- Fuentes principales de contaminación.
- Intrusión marina o salinización natural.

ACUÍFEROS DECLARADOS SOBREEXPLOTADOS: Estos acuíferos entrarían entre los prioritarios para ser beneficiarios de dispositivos de recarga. Sin embargo, requieren un trato urgente y al mismo tiempo delicado para no provocar más daños aunque se realice una labor de recarga al realizar posibles cambios críticos en complejas redes hídricas:

- Año de declaración.
- Estudios de detalle de evolución de cantidad y calidad del agua.

- Medidas de recuperación aplicadas.
- Principales usos y consumos.
- Índice de bombeo y recarga.

ZONAS VULNERABLES A LA CONTAMINACIÓN AGRARIA DIFUSA: La existencia de una directiva europea exclusiva dota de mayor relevancia a esta capa:

- Superficie declarada legalmente.
- Perímetros de protección.
- Fuente agraria (difusa) o ganadera (puntual) de contaminación.
- Medidas de aplicación de Códigos de Buenas Prácticas.
- Datos de seguimiento de calidad de aguas y suelos por la directiva.

RED ICA SUBTERRÁNEA: Puntos dentro de la red de aguas superficiales que implican:

- Calidad del agua como recurso para diferentes dispositivos de recarga.
- Calidad del agua como limitante para su uso para recarga o necesidades de mejora.

División botánica

INVENTARIO FORESTAL NACIONAL II E IFN III: Los datos de las superficies forestales pueden servir para localizar:

- Cubierta vegetal sobre áreas de recarga.
- Zonas arboladas para fomento de infiltración y depuración.
- Anchura de la banda vegetada en riberas.

CORINE: Esta capa mezcla datos de teledetección referentes a usos con desgloses sobre cubiertas vegetales o formaciones geomorfológicas. Este apartado se plantea para el estudio específico de su componente botánico:

- Distribución de la cubierta vegetal para evaluar su evolución temporal, tendencias y su influencia en la infiltración.
- Localización de asociaciones sensibles como estepas o salinas.

División zoológica

Aunque la distribución del Atlas de vertebrados tenga una resolución de 100 km^2 puede servir para aplicar criterios de valoración zoológica de la recarga. Fundamentalmente se realizarían mapas donde la presencia de especies sensibles positiva o negativamente a la existencia de láminas de agua condicionarían la existencia o no de la recarga o su método de aplicación.

PECES Y ANFIBIOS: La localización de endemismos y especies protegidas de humedales, costas o tramos de alta montaña y su relación con objetivos de calidad del agua pueden justificar ciertas acciones de recarga específicas o limitarla dependiendo de la conexión hidráulica del hábitat dónde se ubiquen dichos taxones.

AVES Y MAMÍFEROS: La gran relevancia de los humedales y los ecosistemas fluviales en la protección de fauna emblemática como el pato malvasía o la nutria europea sirve para incentivar labores de recarga como elementos restauradores.

División ecológica

Este grupo de datos engloba temas que por confluencia de diversas causas ha provocado la existencia de espacios protegidos:

RED NATURA 2000: La localización de estos espacios debe analizarse teniendo en cuenta tanto el ámbito de influencia del caudal extraíble como los efectos aguas abajo de la recarga (Ver EIA).

LICs y ZEPAs: La existencia de informes más detallados sobre estas áreas permitirá establecer prioridades y limitaciones.

HÁBITATS: Debido a la escasa homogeneidad de esta capa se recomienda su uso de forma muy discrecional.

HUMEDALES: La proximidad física o la inclusión dentro de la cuenca aportante de un humedal Ramsar condicionarán de manera determinante las condiciones técnicas de un dispositivo MAR.

División por usos

Los usos actuales condicionan ciertos riesgos para la calidad del agua, pero simultáneamente reflejan tendencias en las necesidades de recarga y/o potenciales fuentes de aportes con o sin necesidades de tratamiento anterior o posterior.

NÚCLEOS MUNICIPALES: Los TTMM condicionan varios aspectos:

- Riesgos de inundabilidad (Seguridad) y contaminación (Salud).
- Potencialidad de recursos reciclables.
- Necesidades crecientes de usos múltiples (boca, riego, industrial, recreativo).

CULTIVOS Y APROVECHAMIENTOS: Si el regadío puede variar su demanda hídrica incrementándola o disminuyéndola por cambio de cultivo, el secano puede suponer teóricamente un potencial regadío futuro.

REGADÍOS: El consumo de agua para riego representa casi el 70% del recurso total por lo que condiciona totalmente la gestión hídrica.

- Origen del agua: Según sean superficiales, subterráneas, de retorno, depuradas o desaladas condicionarán los requerimientos de MAR
- Sistema de riego: Los regadíos por gravedad presentan un alto consumo y una baja eficiencia pero también generan retornos.
- Regadíos en ejecución y sociales: Estas áreas incrementan a corto plazo la demanda de agua.

CORINE: La variedad de clases de esta capa permite establecer numerosos criterios de valoración:

- Fuentes y tipo de riesgo de polución según uso.
- Riesgo de contaminación accidental por cruce con redes de transporte.
- Necesidades y limitaciones por uso actual.
- Calidades de agua necesarias por usos y por tipologías de humedales.

Aplicación al CORINE

Como ejemplo de la aplicación de criterios ambientales a una capa cartográfica figuran a continuación los reagrupamientos propuestos para la leyenda de CORINE de 85 campos a 17 campos atendiendo a sus características ambientales comunes respecto a la recarga *(Ver tabla 1*).

Las consideraciones ambientales que se han podido aplicar a esta capa han sido divididas en seis grupos principales:

1- FUENTES DE CONTAMINACIÓN: Determinados usos ya establecidos provocan determinados riesgos de contaminación.

- Forma de dispersión: La difusa es más difícil de controlar pero la puntual suele ser más grave en cuanto a efectos agudos locales inmediatos.
  - Fuente difusa.
  - Fuente puntual.

- Origen por uso: Cada una implica la existencia de riesgos para la calidad del agua a recargar. Los nitratos, restos de compuestos químicos de síntesis o sólidos arrastrados requieren diferentes tratamientos antes de usar un aporte de origen agroganadero, industrial o de escorrentía natural para la recarga artificial:
  - Contaminación urbana (DBO y medicamentos).
  - Contaminación agraria (fertilizantes y pesticidas).
  - Contaminación ganadera (Nitratos, medicamentos veterinarios y metales pesados).
  - Contaminación industrial (metales pesados, residuos tóxicos).
  - Contaminación por Sólidos en Suspensión.

2- RIESGOS: La localización o uso del terreno determina el riesgo que puede poner en peligro la viabilidad de la recarga o la necesidad de dicha actuación.

- Intercepción de flujos (acuíferos y escorrentías).
- Vertidos accidentales.
- Presencia de endemismos biológicos.
- Intrusión salina.
- Efectos sobre la salud.

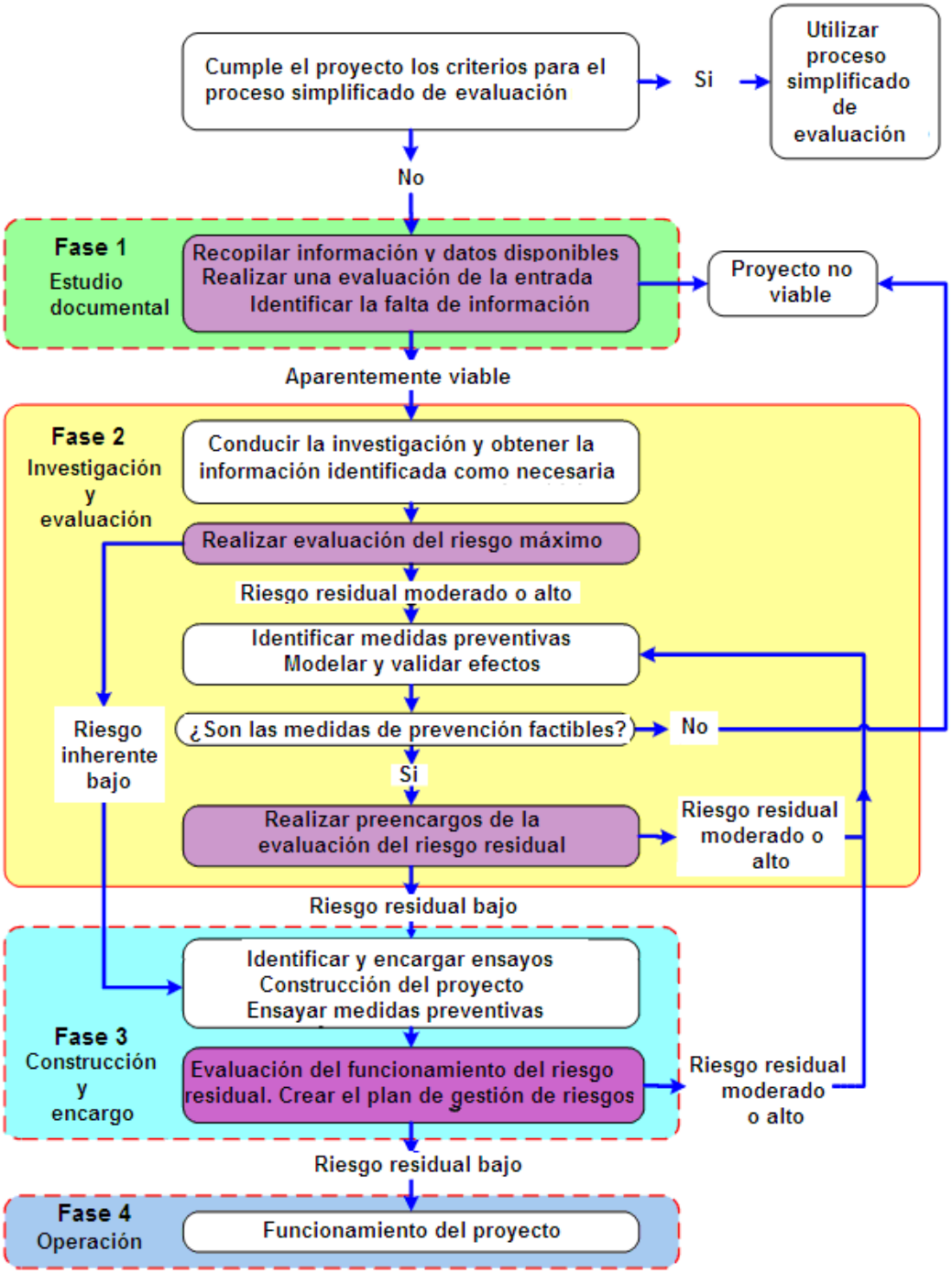
Este aspecto es uno de los más trabajados en las referencias consultadas, por citar algunos trabajos, mencionamos Dillon, 2009 y EPHC 2008.

El estudio de riesgos no ha sido un objetivo prioritario en DINA-MAR, si bien se ha empleado abundante bibliografía e incluso traducido al español una figura relativa a prácticas operacionales, que se presenta a continuación (figura 4-01).

La respuesta de un acuífero ante amenazas cualitativas depende de las condiciones concretas de cada acuífero y sus circunstancias ambientales.

Entre los parámetros a controlar cabe destacar la atenuación de patógenos y compuestos orgánicos en distintas condiciones, lo que permite estudiar el proceso de atenuación, valorar riesgos y evaluar impactos. La intensidad y sobre todo la escala variarán conforme al proceso, siendo la zona de actuación muy diferente si se trata de presiones, problemas de colmatación, eficiencia en la recuperación del agua recargada, interacción entre distintos usos del agua, protección contra la intrusión salina, protección de los ecosistemas hidrodependientes, tratamiento químico del agua, e incluso labores de limpieza y mantenimiento.

Figura 4-01. Etapas para el establecimiento de una nueva experiencia de gestión de la recarga conforme a aspectos medioambientales y farmacológicos, de acuerdo con los criterios establecidos en EPHC 2008. Traducido de EPHC, 2008, y de Dillon, 2009 (página siguiente).


Cumple el proyecto los criterios para el proceso simplificado de evaluación
Si
Utilizar proceso simplificado de evaluación
No
Fase 1
Estudio documental
Recopilar información y datos disponibles
Realizar una evaluación de la entrada
Identificar la falta de información
Proyecto no viable
Aparentemente viable
Fase 2
Investigación y evaluación
Conducir la investigación y obtener la información identificada como necesaria
Realizar evaluación del riesgo máximo
Riesgo residual moderado o alto
Identificar medidas preventivas
Modelar y validar efectos
Riesgo inherente bajo
¿Son las medidas de prevención factibles?
No
Si
Realizar preencargos de la evaluación del riesgo residual
Riesgo residual moderado o alto
Riesgo residual bajo
Identificar y encargar ensayos
Construcción del proyecto
Ensayar medidas preventivas
Fase 3
Construcción y encargo
Evaluación del funcionamiento del riesgo residual. Crear el plan de gestión de riesgos
Riesgo residual moderado o alto
Riesgo residual bajo
Fase 4
Operación
Funcionamiento del proyecto

3- CONDICIONANTES: Existen características intrínsecas al uso o a la asociación que exigen un tipo u otro de dispositivo MAR o simplemente determinan que dicha recarga no supere ciertas cotas en ciertos momentos:

- Pendientes pronunciadas.
- Alta escorrentía.
- Cota alta.
- Estacionalidad de la lámina libre de agua (continua o temporal).
- Freático elevado.
- Existencia de periodos secos.

4- DEMANDAS: Las necesidades varían no solo en cuanto a calidad exigible sino también a su distribución espacial y temporal:

- Agua potable.
- Recreativa (baño).
- Ecológica.
- Refrigeración.
- Riego.
- Energía (hidroeléctrica).

5- TENDENCIAS: De cara a una viabilidad y rentabilidad de los dispositivos es preciso no sólo evaluar los usos actuales sino las tendencias que se esperan en dichos usos, como la extensión del riego sobre secanos o las implicaciones del cambio climático:

- Intensificación.
- Sensible a cambio climático.
- Demanda potencial de riego.
- Zona preferente de restauración.

6- VENTAJAS: Los usos actuales pueden plantear buenas oportunidades para la aplicación de la técnica MAR en cuanto a:

- Generación de retornos.
- Filtro verde.
- Localización zonas de recarga.
- Descarga lenta.
- Fuente para desaladora.
- Fuente para EDAR.
- Infiltración mínima.

A partir del cruce de ambas listas se ha completado una matriz que sirve para evaluar la capacidad y la condicionalidad de cada tipo de uso/cobertura con respecto a cierto tipo de MAR. La existencia de relación entre filas y columnas se ha marcado con una X y para cada descriptor y cada grupo de consideraciones ambientales se ha contabilizado el número de cruces para estimar numéricamente la complejidad de las valoraciones. Esta labor se seguirá realizando sucesivamente con cada una de las capas con información relevante para caracterizar la potencialidad ambiental del MAR.

De esta forma se obtendrán mapas de capacidad de usos para los distintos factores que determinan el medio donde se puede poner en marcha un dispositivo MAR. Se obtendrán salidas gráficas para localizar las posibilidades de los dispositivos MAR en base a unos condicionantes ambientales contrastables (tarea llevada a cabo en DINA-MAR con apoyo GIS, véase el capítulo 5).

INDICADORES ESPECÍFICOS PARA LA GESTIÓN DE LA REGARGA

Un indicador ambiental requiere del ámbito de una Política de medio ambiente y del ámbito de una Estadística ambiental disponible. La necesidad de indicadores se fundamenta en:

- Información adecuada para la toma de decisiones en materia de medio ambiente.
- Reducir la gran cantidad de información a un número manejable de parámetros.

Además, la construcción de un sistema de indicadores se enfrenta a los retos de:

- Visión totalizadora de los intereses relativos al medio ambiente.
- Inexistencia de una teoría científica que englobe las relaciones del hombre en la biosfera.
- Dependencia del sistema social.

Su organización analítica se viene estructurando según:

- Marco temático.
- Estructura por medios.
- Marco sectorial.
- Enfoque espacial.
- Marco ecosistémico.
- Marco causal.

Definición de indicador ambiental

Un indicador ambiental es una variable que ha sido socialmente dotada de un significado añadido al derivado de su propia configuración científica, con el fin de reflejar de forma sintética una preocupación social con respecto al medio ambiente e insertarla coherentemente en el proceso de toma de decisiones (Fig. 4-02).

Criterios de selección

La selección de indicadores hace indispensable que cumplan con una serie de requisitos que garanticen su efectividad. Los criterios de selección más utilizados a nivel internacional son los que ha establecido la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE):

- Validez científica.
- Representatividad.
- Sensibilidad a cambios.

- Fiabilidad de los datos.
- Relevancia.
- Comprensible.
- Predictivo.
- Metas.
- Comparable.
- Cobertura geográfica.
- Coste-eficiente.

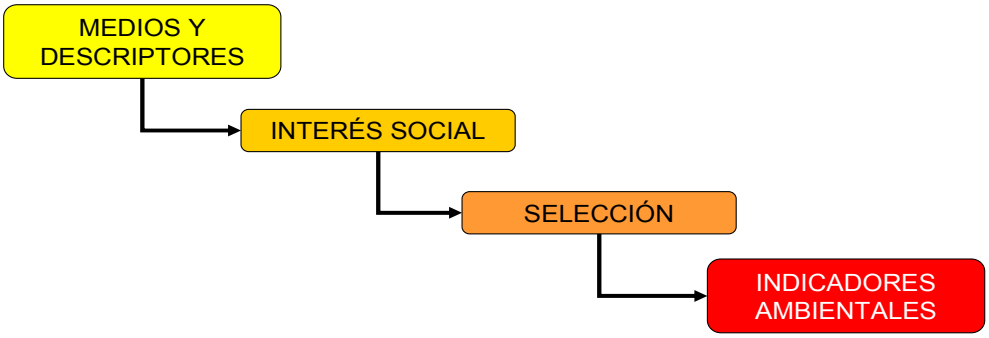


Figura 4-02. Definición de indicadores.

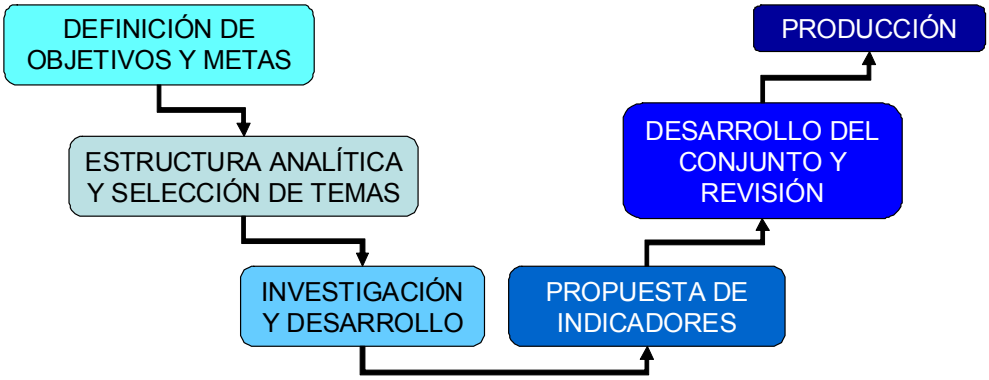


Figura 4-03: Procedimiento de elaboración de indicadores.

Por su parte, el Consejo de la Unión Europea ha establecido los siguientes criterios: Pertinencia (pertinencia conceptual, pertinencia geográfica, pertinencia en relación con los actores), eficacia, validez científica, validez estadística, viabilidad y coste.

Mecanismo de la información

El marco causal del sistema de indicadores se viene estableciendo considerando modelos como el PER (Presión-Estado-Respuesta) o el PERFMI (Presión-Estado-Respuesta-Fuerzas motrices-Impacto).

Metodológicamente, el diseño de indicadores medioambientales empleado se apoya en el sistema PER, sistema que diferencia indicadores de presión, estado y respuesta. Este modelo ha sido el seguido en numerosos sistemas de indicadores en la actualidad, al estar basado en un principio de causalidad, en el que las actividades humanas ejercen una presión sobre el medio ambiente, presión que puede provocar cambios en su estado, y finalmente la sociedad adopta respuestas para hacer frente a las consecuencias negativas de las presiones ejercidas.

El número de indicadores posibles es relativo a los objetivos que se marquen en cada unidad hidrogeológica considerada y dependerá del estado actual y futuro esperado de la evolución esperable de los usos, de las presiones detectadas y su prospección a corto y largo plazo etc. En los apartados que siguen a continuación se propone una batería de indicadores posibles considerando el estado inicial de una masa de agua española, las presiones habituales a las que se enfrenta y la posible evolución de un dispositivo de recarga.

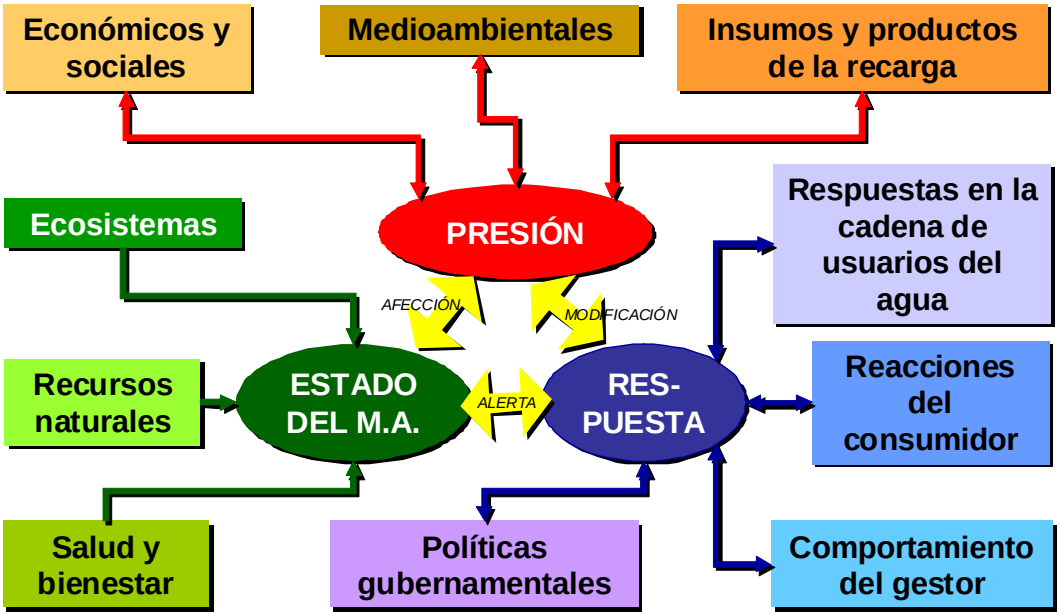


Figura 4-04. Modelo de indicadores PER para la recarga artificial.

No se debe olvidar que lo más importante de cualquier indicador es que la relación causa-efecto esté rigurosamente sustentada por lo que las variaciones serán proporcionales, permitirán un sistema de alerta temprano y la aplicación de medidas correctoras para subsanar problemas detectados.

INDICADORES DE ESTADO

La recarga artificial de acuíferos se concibe, en primer lugar, como un proyecto a evaluar desde criterios de sostenibilidad. Por sostenibilidad se asume su viabilidad ambiental, social y económica en términos de ecología, redistribución y crecimiento

respectivamente. Por tanto, el diagnóstico y seguimiento de la misma recomienda la utilización de indicadores en este triple objetivo.

Atendiendo a los principales efectos en cada proyecto de recarga artificial de acuíferos, se establece la definición de indicadores que permitan evaluar las consecuencias ambientales y socioeconómicas, pertinentes a un procedimiento de EIA.

En este apartado se contemplan los índices que dan idea del estado en el que se encuentran los acuíferos y que determinan su potencialidad para la instalación de dispositivos de recarga ARTIFICIAL.

- Nivel freático medio de la UH.
- Permeabilidad del acuífero y nivel de colmatación.
- Conductividad eléctrica de las aguas subterráneas.
- Calidad de las aguas subterráneas (Sólidos en Suspensión, N/P/K, metales pesados, pesticidas).
- Superficie de humedales estacionales y permanentes sobre la UH.
- Densidad de puntos de entrada al acuífero (fisuras, permeables, minas, canteras…).
- Diversidad zoológica relacionada con humedales.
- Especies vegetales protegidas asociadas a humedales.
- Distancia kilométrica entre puntos de entrada a posibles orígenes de agua para recarga.

INDICADORES DE PRESIÓN

La presión sobre el medio es la que nos indica las fuentes ajenas a las masas de agua que potencian la necesidad de establecer dispositivos MAR:

- Índice de bombeo y recarga.
- Eficiencia del riego sobre la UH por sectores de riego homogéneo.
- Usos (agrario, urbano, industrial) por origen del agua (superficial, subterráneo, reutilización).
- Superficie (ha) declarada sobreexplotada.
- Superficie declarada vulnerable a la contaminación agraria difusa.
- Superficie de regadío asociada a la masa de agua.
- Caudal de salida de EDAR en la subcuenca.
- Calidad de salida de las EDAR y otros vertidos (urbanos, agrarios…).
- Porcentaje de agua producida y consumida anualmente dentro de la Unidad.
- Localización y densidad de puntos de vertido por km^2 en la subcuenca.
- Relación Precio/Coste del agua en €/m^3.

Los distintos usos generan una presión sobre el acuífero pero al mismo tiempo también son fuente de posibles caudales para recarga, desde uso agrio y el retorno del riego hasta el uso urbano con sus consumos reutilizables.

INDICADORES DE RESPUESTA

En este grupo se añaden los índices que permiten evaluar la respuesta humana ante los problemas derivados de la recarga, de su gestión o de sus impactos derivados:

- Inversión en recarga de acuíferos por masa de agua (€ en obra, gestión y mantenimiento).
- Volumen recargado por uso (m3 uso agrario, urbano, ecológico).
- Perímetro mojado de humedales asociados a UH durante el año (m/año).
- Índice de ahorro de recursos hídricos superficiales por recarga (m3/anuales).
- Volumen recargado estacionalmente respecto a la precipitación (%).
- Volumen recargado según origen y tipos de dispositivos (%).
- Incremento de la garantía de dotación para los diferentes usos por recarga (%).
- Coste de recarga (€/m3).
- Mano de obra empleada en recarga (UT).
- Población beneficiada anualmente de la recarga (habitantes/m3).
- Consumo de energía para bombeo de agua recargada (€/m3).

El objeto de estos indicadores y todos los que se podrían proponer es el de realizar un seguimiento a los dispositivos de cara a valorar posibles alternativas técnicas de gestión de cara a mejorar su eficiencia y rentabilidad.

CONCLUSIONES

Las distintas capas cartográficas y las bases de datos pueden usarse como herramienta interpretativa para idoneidad ambiental de la aplicación de las técnicas MAR

Se han establecido 6 grupos de criterios ambientales básicos para la aplicación de MAR:

- Fuentes de contaminación.
- Riesgos.
- Condicionantes.
- Demandas.
- Tendencias.
- Ventajas.

La aplicación de dichos criterios determina zonas con potencialidad o limitaciones para la planificación ambiental de la recarga.

Los indicadores de recarga deben orientarse de cara a tres objetivos principales:

- Estado: Establecer la potencialidad del medio para la recarga artificial.
- Presión: Evaluar las presiones externas positivas y negativas que condicionan la recarga.
- Respuesta: Valorar los posibles efectos socioeconómicos.

Tabla 4-01. Matriz de cruce entre clases del CORINE y condicionantes ambientales de la gestión de la recarga (antes recarga artificial). Aspecto general y ampliación.

	CONTAMINACIÓN								RIESGOS				CONDICIONANTES									DEMANDA					TENDENCIAS			VENTAJAS						
	dispers		por uso																																	
DESCRIPCION	Fuente difusa	Fuente puntual	Contaminación urbana	Contaminación agraria	Contaminación ganadera	Contaminación industrial	Contaminación por SS	Intercepción de flujos	Vertidos accidentales	Endemismos biológicos	Intrusión salina	Efectos sobre la salud	Alta pendiente	Alta escorrentía	Cota alta	Lámina libre de agua continua	Lámina libre de agua temporal	Freático alto	Existencia de períodos secos	Potable	Recreativa (baño)	Ecológica	Refrigeración	Riego	Energía	Intensificación	Sensible a cambio climático	Demanda potencial para riego	Zonas preferentes de restaurac	Generación de retornos	Filtro verde	Localización de recarga	Descarga lenta	Fuente para desaladora	Fuente EDAR	Infiltración mínima	TOTAL
Perennifolias																					X									X						2
Caducifolias y rebollares																					X									X						2
Otras frondosas de plantación																					X									X						2
Mezcla de frondosas																					X									X						2
Laurisilva macaronésica										X											X									X						3
Pináceas																					X									X						2
Sabinares y enebrales																					X									X						2
Bosque mixto																					X									X						2
Bosques de ribera										X								X			X									X						4
Landas y matorrales templado oceánicos																					X									X						2
Fayal-brezal macaronésico										X											X									X						3
Grandes formaciones de matorral denso o medianamente denso																					X									X						2
Matorrales subarbustivos o arbustivos muy poco densos																					X									X						2
Matorrales subarbustivos o arbustivos muy poco densos																					X									X						2
Matorral de frondosas																					X									X						2
Matorral de coníferas																					X									X						2
Matorral de bosque mixto																					X									X						2
Xeroestepa subdesértica								X		X							X		X																	4
Praderas	X				X																									X						3
Pastizales supraforestales templado-oceánicos, pirenaicos y orocantábricos	X				X																							X		X						4
Pastizales supraforestales mediterráneos	X				X																							X		X						4
Otros pastizales templado oceánicos	X				X																							X		X						4
Otros pastizales mediterráneos	X				X																							X		X						4
Mosaico de cultivos anuales con cultivos permanentes	X		X																									X	X							4
Mosaico de cultivos agrícolas, pero con importantes espacios de vegetación natural	X		X																									X		X						4
Mosaico de cultivos agrícolas en secano con espacios significativos de vegetación n	X		X																									X		X						4
Mosaico de prados o praderas con espacios significativos de vegetación natural y se	X			X																								X		X						4
Pastizales, prados o praderas con arbolado adehesado	X			X																								X		X						4
Cultivos agrícolas con arbolado adehesado	X		X																									X		X						4
Cultivos herbáceos en regadío	X		X																							X	X		X	X						6
Otras zonas de irrigación	X		X																							X	X		X	X						6
Arrozales	X		X																							X	X		X	X						6
Viñedos en regadío	X		X																							X	X			X						5
Cítricos	X		X																							X	X			X						5
Frutales tropicales	X		X																							X	X			X						5
Otros frutales en regadío	X		X																							X	X			X						5
Olivares en regadío	X		X																							X	X			X						5
Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes en regadío	X		X																							X	X		X	X						6
Mosaico de cultivos anuales con prados o praderas en regadío	X		X	X																						X	X		X	X						7
Mosaico de cultivos permanentes en regadío	X		X																							X	X		X	X						6
Mosaico de cultivos anuales con permanentes en regadío	X		X																							X	X		X	X						6
Tierras de labor en secano	X		X																								X									3
Viñedos en secano	X		X																								X									3
Frutales en secano	X		X																								X									3
Olivares en secano	X		X																								X									3
Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes en secano	X		X																								X									3
Mosaico de cultivos anuales con prados o praderas en secano	X		X																								X									3
Mosaico de cultivos permanentes en secano	X		X																								X									3
Mosaico de cultivos anuales permanentes en secano	X		X																								X									3
Playas y dunas								X			X									X	X					X					X					6
Ramblas con poca o sin vegetación								X					X	X								X						X		X						5
Rocas desnudas con fuerte pendiente (acantilados, etc.)								X					X	X								X						X		X						5
Afloramientos rocosos y canchales								X						X																X			X			4
Coladas lávicas cuaternarias														X																X			X			3
Cárcavas y/o zonas en proceso de erosión								X					X	X														X		X						5
Espacios orófilos altitudinales con vegetación escasa								X		X			X	X	X															X						6
Zonas quemadas	X							X						X					X									X								5
Glaciares y nieves permanentes										X			X		X							X				X					X					6
Marismas										X	X					X	X					X				X						X				7
Zonas llanas intermareales										X	X					X	X	X	X			X				X						X				9
Lagunas costeras										X	X					X						X				X						X				6
Estuarios										X	X					X					X	X				X						X				7
Mares y océanos											X					X					X	X				X						X				6
Humedales y zonas pantanosas										X						X	X	X				X				X										6
Turberas										X							X	X				X				X					X					6
Salinas										X	X					X	X	X				X				X						X				8
Ríos y cauces naturales										X				X		X		X			X	X			X	X										8
Lagos y lagunas										X						X	X	X			X	X				X										7
Canales artificiales									X	X				X			X				X			X													6
Embalses									X	X							X				X	X		X	X												7
Autopistas,autovías y terrenos asociados		X			X				X	X				X																					X	6
Complejos ferroviarios		X			X				X	X				X																					X	6
Zonas portuarias		X			X				X	X				X																				X	X	7
Aeropuertos		X			X				X					X																					X	5
Tejido urbano continuo		X	X		X							X		X							X				X									X	X	9
Estructura urbana laxa	X		X									X									X				X									X	X	7
Urbanizaciones exentas y/o ajardinadas	X		X									X									X				X			X						X		7
Grandes superficies de equipamientos y servicios		X	X									X		X							X	X			X									X	X	9
Zonas en construcción	X		X					X	X	X		X									X				X					X						9
Resto de instalaciones deportivas y recreativas		X	X									X									X	X			X	X									X	8
Zonas verdes urbanas	X			X								X												X	X				X							6
Campos de Golf	X			X								X												X	X				X							6
Zonas industriales		X			X					X	X	X									X			X				X								8
Zonas de extracción minera		X			X	X	X			X	X	X												X						X						10
Escombreras y vertederos		X			X		X					X													X				X							6
Sin clasificar o exclusión																																				0
	37	10	6	26	8	8	10	9	8	15	9	11	5	15	2	11	7	7	3	9	8	29	2	4	2	9	24	31	6	10	41	8	2	8	4	10	414

CONTAMINACIÓN						RIESGOS					CONDICIONANTES					
por dispersion		por uso														
Fuente difusa	Fuente puntual	Contaminación urbana	Contaminación agraria	Contaminación ganadera	Contaminación industrial	Contaminación por SS	Intercepción de flujos	Vertidos accidentales	Endemismos biológicos	Intrusión salina	Efectos sobre la salud	Alta pendiente	Alta escorrentía	Cota alta	Lámina libre de agua continua	Lámina libre de agua temporal	Freático alto	Existencia de periodos secos

DEMANDA						TENDENCIAS				VENTAJAS						
otable	Recreativa (baño)	Ecológica	Refrigeración	Riego	Energía	Intensificación	Sensible a cambio climático	Demanda potencial para riego	Zonas preferentes de restauración	Generación de retornos	Filtro verde	Localización de recarga	Descarga lenta	Fuente para desaladora	Fuente EDAR	Infiltración mínima

DESCRIPCION
Perennifolias
Caducifolias y rebollares
Otras frondosas de plantación
Mezcla de frondosas
Laurisilva macaronésica
Pináceas
Sabinares y enebrales
Bosque mixto
Bosques de ribera
Landas y matorrales templado oceánicos
Fayal-brezal macaronésico
Grandes formaciones de matorral denso o medianamente denso
Matorrales subarbustivos o arbustivos muy poco densos
Matorrales subarbustivos o arbustivos muy poco densos

Matorral de frondosas
Matorral de coníferas
Matorral de bosque mixto
Xeroestepa subdesértica
Praderas
Pastizales supraforestales templado-oceánicos, pirenaicos y orocantábricos
Pastizales supraforestales mediterráneos
Otros pastizales templado oceánicos
Otros pastizales mediterráneos
Mosaico de cultivos anuales con cultivos permanentes
Mosaico de cultivos agricolas, pero con importantes espacios de vegetación natural y semi-natural.
Mosaico de cultivos agrícolas en secano con espacios significativos de vegetación natural y semi-natural
Mosaico de prados o praderas con espacios significativos de vegetación natural y semi-natural
Pastizales, prados o praderas con arbolado adehesado
Cultivos agrícolas con arbolado adehesado
Cultivos herbáceos en regadío
Otras zonas de irrigación
Arrozales
Viñedos en regadío
Cítricos
Frutales tropicales
Otros frutales en regadío
Olivares en regadío
Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes en regadío
Mosaico de cultivos anuales con prados o praderas en regadío
Mosaico de cultivos permanentes en regadío
Mosaico de cultivos anuales con permanentes en regadío
Tierras de labor en secano
Viñedos en secano
Frutales en secano
Olivares en secano
Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes en secano
Mosaico de cultivos anuales con prados o praderas en secano
Mosaico de cultivos permanentes en secano
Mosaico de cultivos anuales permanentes en secano
Playas y dunas
Ramblas con poca o sin vegetación
Rocas desnudas con fuerte pendiente (acantilados, etc.)
Afloramientos rocosos y canchales
Coladas lávicas cuaternarias
Cárcavas y/o zonas en proceso de erosión
Espacios orófilos altitudinales con vegetación escasa

Zonas quemadas
Glaciares y nieves permanentes
Marismas
Zonas llanas intermareales
Lagunas costeras
Estuarios
Mares y océanos
Humedales y zonas pantanosas
Turberas
Salinas
Ríos y cauces naturales
Lagos y lagunas
Canales artificiales
Embalses
Autopistas,autovías y terrenos asociados
Complejos ferroviarios
Zonas portuarias
Aeropuertos
Tejido urbano continuo
Estructura urbana laxa
Urbanizaciones exentas y/o ajardinadas
Grandes superficies de equipamientos y servicios
Zonas en construcción
Resto de instalaciones deportivas y recreativas
Zonas verdes urbanas
Campos de Golf
Zonas industriales
Zonas de extracción minera
Escombreras y vertederos
Sin clasificar o exclusión

BIBLIOGRAFÍA

- Bouwer H. (2002). "Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering". Hydrogeology Journal 10: 121-142. http://www.springerlink.com/content/u0r3xtxnnfqm4p6y/
- Central Ground Water Board. (2000) "Guide on Artificial Recharge to Ground Water" Ministry of Water Resources, New Delhi (India) http://cgwb.gov.in/documents/Guide_on_ArtificialRecharge.pdf
- Central Ground Water Board Ministry of Water Resources & International Hydrological Programme (IHP) UNESCO. (2000) "Catch the water - where it drops: rain water harvesting and artificial recharge to ground water, a guide to follow" UNESCO http://www.unesco.org/water/ihp/publications/water_harvesting.pdf
- Fernández, E. (2005) "Propuesta de un sistema de indicadores medioambientales para la Evaluación de Impacto Ambiental y seguimiento de actividades de regeneración hídrica mediante recarga artificial de acuíferos (primera parte: estado-presión)" Tecnología y desarrollo Vol. III año 2005 separata http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECEOC05_004.pdf
- Fernández, E. (2005) "Seguimiento y control de la restauración de Humedales, mediante técnicas de recarga artificial de acuíferos a partir del diseño de un sistema de indicadores medioambientales" Tecnología y desarrollo VIII año 2005 separata http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECEOC05_003.pdf
- Fernández, E. (2006) "Descripción de indicadores medioambientales para la Evaluación de Impacto Ambiental, seguimiento y control de la restauración de humedales mediante técnicas de recarga artificial de acuíferos (segunda parte: indicadores de respuesta)" Tecnología y desarrollo Vol. IV año 2006 separata http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECEOC06_002.pdf
- Focazio, Michael J, Reilly, Thomas E, Rupert, Michael G. y Helsel, Dennis R. (2002) "Assessing Ground-Water Vulnerability to Contamination: Providing Scientifically Defensible Information for Decision Makers" U.S. Geological Survey Circular 1224
- Gale I. (2005). "Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas" IAH–MAR, UNESCO IHP. Paris, Francia. http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001438/143819E.pdf
- Hills Angus. G. (1970). "Developing a better environment", Ontario Economic Council, Toronto.
- Hukka, Jarmo J. y Seppälä Osmo, T. (2005). "One of 29 WaterTime case studies on decision-making on water systems: Tampere" http://www.watertime.net/wt_cs_cit_ncr.asp#Finland
- IGRAC "Global Inventory of Artificial Recharge" UNESCO http://igrac.nitg.tno.nl/marmain.html
- IWMI-Tata Water Policy Program 2002 "Innovations in Groundwater Recharge" Water Policy Briefing 1 http://www.iwmi.cgiar.org/waterpolicybriefing/files/wpb01.pdf
- McChesney, D. (2001). "Artificial Storage and Recovery of Ground Water. Progress Report" Washington State Department of ecology Olympia WA Pub number 01-11-019 http://www.ecy.wa.gov/biblio/0111019.html
- Rusteberg, B. (2006). "Groundwater Artificial Recharge by Alternative Sources of Water to guarantee Water Supply in the Future: The European Research Project GABARDINE" Conferencia en AQUA http://www.ath.aegean.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=8758

- SEWRPC. (2006). "State-of-the-art of water supply practices chapter VI: artificial groundwater recharge and management" Technical Report No. 43 http://dnr.wi.gov/org/water/dwg/gac/presentations/contents.pdf
- Sinisi, L. (2005). "Impact assessment of aquifer" NEPA, http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/wsh0308chap5.pdf
- Tamas, P. (2003). "Water Resource Scarcity and Conflict: Review Of Applicable Indicators and Systems of Reference" UNESCO Technical Documents in Hidrology PC+CP series 21 http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001333/133307e.pdf
- WHO. (2001). "WHO expert consultation on health risks in aquifer recharge using reclaimed water: Report on a meeting of an expert group" Budapest, Hungría http://www.euro.who.int/document/wsn/WSNgroundwaterrpt.pdf
- WHO. (2003). "Health risks in aquifer recharge using reclaimed water - State of the art report" Edited by R. Aertgeerts y A. Angelakis http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/wsh0308/en/index.html
- EPHC / NRMMC / NHMRC (2008). "Draft Managed Aquifer Recharge Guidelines. Phase 2 of Australian Guidelines for Water Recycling. Public Consultation Draft, May 2008". Environment Protection and Heritage Council, Natural Resource Management Ministerial Council and National Health and Medical Research Council. http://www.ephc.gov.au/ephc/water_recycling.html.
- Dillon, P. (2009). Progress with managed aquifer recharge in Australia. Water Recycling and Diversified Supplies, Water for a Healthy Country Flagship Program. CSIRO Land and Water. IGSTH 2009.

CRITERIOS PARA EL ESTABLECIMIENTO DE CAUDALES ECOLÓGICOS EN LOS CAUCES DE TOMA. Por Óscar Martínez Tejero.

Este capítulo ha sido redactado por Óscar Martínez con el apoyo de técnicos de la Gerencia de Arquitectura e Ingeniería de Tragsatec. En primer lugar se presenta el estado del arte y su adaptación, y posteriormente se presenta un ejemplo de aplicación para los cauces de toma de los dos principales "laboratorios experimentales" del proyecto.

INTRODUCCIÓN

El principio fundamental que debe regir la elaboración de una metodología de evaluación de caudales ecológicos es que sea realizada con una visión global e integrada, es decir, que se aúnen los intereses ambientales, económicos y sociales.

También sería interesante identificar las conexiones entre el estado de las riberas y la determinación de caudales ecológicos. Habitualmente la restauración de riberas se basa en la recuperación de la vegetación riparia, la cual es dependiente de los caudales de los ríos.

Los lugares de mayor valor ecológico, son aquellos que requieren de una regulación de caudales, en caso de existir ésta, más estricta, y a su vez, son los que presentan mayores complicaciones (hidrológicas, hidráulicas, forestales, etc.) para la restauración de sus márgenes.

CLASIFICACIONES Y MÉTODOS GENERALES

Antes de iniciar una posible clasificación de los tramos para zonificar los ríos, es conveniente clasificar las aguas con algún criterio que nos de información previa sobre su calidad. (A pesar de que ese criterio luego haya de ser ponderado con otros muchos factores). También deben identificarse, en su caso, las posibles especies objetivo a la hora de establecer los caudales ecológicos de determinados tramos o zonas.

Como punto de partida se podrían tomar las clasificaciones que aparecen en determinadas órdenes de vedas para la pesca continental, criterios de prepotabilidad A1, A2, A3, etc.

En base a la primera normativa anteriormente comentada los cuatro tipos fundamentales de aguas continentales podrían ser:

- Aguas trucheras de alta montaña: habitadas por trucha fario autóctona.

- Aguas trucheras de baja montaña: habitadas por trucha arco-iris o fario de repoblación intensiva pero potencialmente aptas para trucha fario en estado salvaje.
- Refugios de pesca: aguas vedadas para la pesca, que suelen ser trucheras, o humedales catalogados.
- Aguas ciprinícolas y de otras especies: habitadas por barbos, carpas, bogas, bermejuelas, lucios, luciopercas, siluros, black bass,…

Para tratar de aunar criterios y agrupar tramos que puedan tener intereses comunes se podría plantear la siguiente propuesta de zonificación:

CAUCES QUE VIERTEN AL MAR

- Indicador objetivo: Aves, estuarios, deltas, riberas, ictiofauna, etc.
- Categorías:
  - S_1: Aguas trucheras de alta o baja montaña, Lics, Zepas, humedal Ramsar,…
  - S_2: Ciprinícolas.

AFLUENTES Y SUBAFLUENTES

- Indicador Objetivo: ictiofauna, aves, etc.
- Categorías:
  - C_1: Aguas trucheras de alta montaña + Vedados de pesca.
  - C_2: Aguas trucheras de baja montaña.
  - C_3: Aguas ciprinícolas y otras especies.
  - C_4: Cualquiera de las aguas anteriores mas una figura de protección.

La zonificación está basada en la identificación de necesidades y posibilidades de regulación para cada tipo de cauce. Si bien, los afluentes son más susceptibles de ser regulados y manejados para unos objetivos concretos de ictiofauna o vegetación y los ríos principales que vierten al mar deben ser regulados también, a partir de las condiciones de manejo aplicadas a sus cauces tributarios.

Dentro de los métodos existentes para evaluar los rangos de caudales ecológicos podemos hacer una clasificación en 4 grandes grupos:

a). Métodos hidrológicos: Método del QBM, Q90, *Aquatic Base Flow*, etc. Están basados en el tratamiento estadístico de series de aforos de 10 años como mínimo. Por lo cual están limitados a cauces aforados. Debe tenerse en cuenta la posible estacionalidad de las medidas de aforo. Estos métodos dejan a un lado las necesidades del biotopo, por tanto, a priori, son sólo recomendables para las aguas tipo S_2 y C_3.

b). Métodos hidráulicos: Método de Montana, método del perímetro mojado, método de Idaho,…. Están basados en la caracterización hidráulica de un cauce, y ver como se comportan las variables fundamentales en función de la especie que queramos conservar (perímetro mojado, área mojada, calado, radio hidráulico). Estos métodos pueden considerarse en el caso de las aguas S1, C2, C4.

c). Métodos de simulación de hábitat: Adaptación IFIM a la península Ibérica (metodología HPU), método BM (método Vasco). Están basado en la simulación de un

hábitat a partir de un modelo hidráulico. Para ello se necesitan las preferencias de las especies objetivo para determinados factores (caudal, profundidad, sustrato del río, velocidad del agua,…) y en determinados estadios de su vida (alevines, juveniles adultos, freza). Estos métodos son muy sensibles a los errores de caracterización geométrica e hidráulica de los cauces, por tanto, no parece recomendable para los grandes ríos españoles. Su aplicación más precisa se encuentra en los pequeños y medianos ríos. Las aguas objetivo de esta metodología podrían ser las C_1, C_2 y C_4.

d). Métodos holísticos: BBM, AHA. Los métodos holísticos podrían definirse como una mezcla de todos los anteriores. Estos métodos se basan en un análisis multidisciplinar consensuado entre los diferentes medios o agentes implicados. Tiene en cuenta aspectos tanto hidrológicos, como hidráulicos, geomorfológicos, socioeconómicos, culturales, etc. Actualmente son ampliamente empleados en Australia, Europa y Norteamérica para la gestión de las grandes cuencas.

Por tanto, la propuesta de zonificación se basa en seis categorías. Cada propuesta llevará asociada una metodología más recomendada, no obstante, deberá discutirse la casuística concreta de cada zona.

Métodos de uso común en España: método de simulación de hábitat y método hidrológico

Los métodos de simulación de hábitat se fundamentan en la metodología IFIM *(Instream Flow Incremental Method)* la cual se basa en tres puntos fundamentales:

1. Curvas de preferencia de la fauna (6 por especie).
2. Valor potencial del hábitat fluvial.
3. Modelo de hidráulica fluvial.

Las curvas de preferencia se establecen para cada especie objetivo y para cada estadio de la vida de esa especie. Los parámetros reflejados, en un ratio de 0 a 1 son: profundidad de las aguas, velocidad de las aguas, anchura del cauce inundado, temperatura, cobertura, granulometría del substrato del fondo.

El método consiste en elegir una serie de secciones de control en el río y dividirlas en celdas diferenciadas. Para cada celda tendremos caracterizada su profundidad media, su velocidad media y el tipo de sustrato.

Después de cruzar esos datos con las curvas de preferencia de las especies objetivo se obtienen una serie de coeficientes. El producto de estos coeficientes es el valor de esa celda como hábitat potencial. Integrando esos valores en una sección transversal (ponderado por la superficie que representan) obtenemos el valor como hábitat potencial del tramo fluvial. Una vez hecho esto, con el modelo hidráulico simulamos para cada caudal los cambios de las variables físicas que se producen en cada celda y el valor como hábitat potencial del tramo fluvial.

Lo que no se ha encontrado en las diversas publicaciones consultadas son los valores óptimos de estos hábitats potenciales, o hasta donde podemos bajar los caudales. Es

decir, no se tienen referencias claras, salvo en zonas muy concretas, de donde termina el caudal ambientalmente admisible para ver donde comienza la escasez.

A partir de esta metodología se pueden establecer una serie de recomendaciones y consideraciones importantes:

- Para la caracterización hidráulica de los cauces se recomiendan 2 medidas como mínimo. Una con aguas altas y otra con aguas bajas.

- Tendremos cuatro curvas de preferencia para cada parámetro hidráulico. En el caso de la trucha por ejemplo habrá una curva para alevín, juvenil, adulto y freza.

- Para los ríos trucheros es muy importante establecer tres caudales ecológicos a saber: de diciembre a marzo para la freza y el desarrollo embrionario, de julio a septiembre en la época estival y el resto del año.

Lejos de lo que pudiese pensarse, los caudales ambientales más condicionantes no parecen ser los requeridos en la época estival, si no los requeridos el resto del año fuera de la época estival: freza y desarrollo embrionario.

- Las curvas de preferencia deben establecerse para cada especie y para cada río, por tanto existe una gran dificultad de calibrar las curvas una a una.

- El método en si mismo, posee una gran capacidad y flexibilidad, pero esto lo hace inabordable para una gran cantidad de tramos. Podría aplicarse pero sólo a tramos muy concretos de evaluación prioritaria.

- El método IFIM está diseñado para trabajar con programas del tipo PHABSIM. Este programa es un simulador del hábitat físico. Plantea una serie de problemas, como la necesidad de una perfecta caracterización de la geometría del cauce o la necesidad de tres medidas con tres calados diferentes, para que el programa funcione dentro de valores aceptables de precisión. Otro problema es la sensibilidad del modelo hidráulico a los datos de campo. Esto hace que el método sea sólo recomendable en el caso de ríos pequeños o medianos, cuya geometría pueda ser perfectamente detallada en múltiples secciones transversales.

La metodología IFIM en la península Ibérica se convierte en la evaluación del hábitat potencial útil (HPU) (Adaptada por García de Jalón). Si tomamos una unidad de longitud de río, el HPU se convierte en la anchura potencial útil (APU).
El objetivo es llegar hasta la relación APU/Q ($m^3 \cdot s^{-1}$). Una vez determinada esa función se puede establecer:

- Caudal mínimo absoluto: Es aquel que genere al menos 1 APU de 1m. A partir de aquí, deben establecerse las relaciones entre los distintos estadios de la especie objetivo. En el caso de la trucha se establece una relación juvenil/adulto de 0,8; 0,3; para la relación alevín/adulto y 0,1 para la relación frezadero/adulto.

- Caudal mínimo de estiaje: Se elige una APU > 50 % del cauce.
- Caudal mínimo óptimo: Donde pierde la pendiente la curva APU/Q.

Debido a que España presenta unos marcados ciclos hidrológicos, García de Jalón recomienda en su metodología que se plantee el cálculo de dos caudales básicos, uno para un año seco y otro para un año húmedo, en función del ciclo que tengamos en ese momento.

Respecto a los programas de simulación de hábitat, a nuestro juicio, se muestra como el más eficiente y práctico el software River 2D. Las ventajas que presenta sobre el programa Phabsim es que resulta más intuitivo y da unos resultados más fácilmente interpretables por una persona no experta en hidráulica.

Dentro de los métodos hidrológicos podemos destacar el QBM (Caudal Básico de Mantenimiento). En Cataluña se emplea el QBM para el Ebro, esto de por sí ya representa una muestra de su idoneidad para los grandes cauces.

El método del QBM utiliza los caudales diarios medios de 10 a 12 años consecutivos, periodo de tiempo considerado lo suficientemente largo como para obtener resultados estables. El QBM calcula la media móvil de 1 a 100 valores consecutivos para cada año.

El principio del año hidrológico es seleccionado asegurándose que no hay periodos de caudales bajos en ninguno de los extremos de la serie anual; de esta manera, todos los periodos de caudales reducidos dentro del ciclo anual hidrobiológico serán incluidos completamente.

Para la determinación del QBM del Ebro, el mes de inicio del año hidrológico es Abril, que es además el mes de mayor diversidad biológica. El método recoge el valor mínimo de cada media móvil, que corresponde a periodos de tiempo de entre 1 y 100 días, y entonces obtiene el valor del Qb para cada año, deducido como el caudal correspondiente al incremento relativo máximo dentro de las series medias de caudales mínimos. El promedio de los valores de Qb para cada año (para los años considerados) es el caudal definido como el caudal mínimo a ser mantenido.

El significado biológico de estos valores se relaciona a la capacidad de los habitantes del río de tolerar caudales reducidos por periodos de tiempo dados. Como con cualquier resultado estadístico, estos valores deben ser tomados con precaución.

La metodología de QBM fue validada hidrobiológicamente en el año 2002 con respecto a la influencia de los caudales QBM en parámetros como la calidad del agua, la producción primaria, los macrobentos, los peces y la variabilidad de hábitats piscícolas.

Es necesario asegurar que el caudal ambiental tiene la suficiente funcionalidad biológica para preservar las condiciones de habitabilidad en el río. De acuerdo con el PHN (en el caso del Ebro), esto se logra a través de mantener una profundidad mínima que permita movilidad a los peces.

La evaluación hidráulica es llevada a cabo entonces para evaluar si el caudal básico (Qb) cumple con el criterio o no; si no lo hace, un caudal suplementario llamado Caudal de Acondicionamiento (Qac) se añade al primer caudal, suficiente para satisfacer los requerimientos de habitabilidad. La suma de Qb y Qac constituyen el Caudal de Mantenimiento (Qman) que es el caudal mínimo absoluto para el río.

El Qman no tiene funcionalidad biológica, pero se necesita incluir la variabilidad estacional para reproducir el régimen natural de caudales y los caudales de capacidad del cauce (caudal máximo que fluye en el curso de agua sin rebosar las orillas) para simular las condiciones de cauce lleno.

La variabilidad estacional es obtenida utilizando un factor de variabilidad estacional (F), índice entre el caudal medio mensual y el caudal medio mensual mínimo del año. Este paso es similar a la metodología BBM (Building Blocks Methodology). Al multiplicar el Qman por el índice F para cada mes, el QBM obtiene un régimen de caudales para todo el año simulando las condiciones naturales.

Como resultado, cada mes del año tiene un valor de caudal diferente que pretende responder a las diferentes necesidades ecológicas estacionales. Aparte de la variabilidad temporal ordinaria, el QBM establece eventos de crecidas que son definidos en términos de la magnitud, la frecuencia, la estacionalidad y la duración.

La metodología de QBM evalúa las funciones ecológicas del río basándose en dos parámetros fácilmente medibles de las series hidrológicas: disponibilidad y periodicidad de caudales.

Es apropiado como un método de evaluación rápida y es fácil de aplicar en cualquier tipo de río a pesar de que está diseñado para ríos mediterráneos que presentan como principal factor limitante la “disponibilidad” de caudales. Por lo tanto, el método QBM se concentra en la obtención de un caudal mínimo dejando de lado inicialmente otros factores como el índice de transporte de sedimentos, la calidad del agua, etc., aunque éstos pueden ser considerados como requisitos del Caudal de Mantenimiento.

El método es muy sensible a la calidad de las series hidrológicas utilizadas; así, si las series presentan errores o no representan las condiciones naturales (Ej., gestión de presas controlando el régimen de caudales), el caudal ecológico determinado no tendrá la calidad ecológica implícita en los principios del método.

La construcción de una nueva presa genera nuevas condiciones hidrológicas (modificando la estructura ecológica del sistema) que pueden ser consideradas como “naturales” si se mantienen por un periodo de tiempo considerable. Tomando como base estas premisas, cualquier evaluación hidrológica simplemente reducirá el régimen de caudales ambientales (RCA) con cada presa nueva. De esta manera se vuelve más y más relevante restaurar los valores previos y prístinos de un río que ya está regulado antes de emprender cualquier evaluación del régimen de caudales ambientales.

Otro aspecto es la necesidad de crecidas periódicas y su rol en reproducir el régimen natural del río. La simulación del caudal de capacidad del cauce es necesaria para preservar la composición del sustrato, la morfología del lecho del río, un buen estado de

la zona hiporreica y compensar la presión colonizadora de la vegetación ribereña. Sin embargo, ya que el caudal de sección llena deberá estar a escala de la magnitud del régimen de caudales anuales del QBM, el documento del PHN concluye que será necesario un análisis más profundo al respecto.

Consideraciones hidrogeológicas

A la hora de estimar rangos de caudales ambientales, y sobre todo a la hora de establecerlos efectivamente, se deberían tener en cuenta ciertas consideraciones hidrogeológicas, sobre todo en el caso de los métodos de simulación de hábitat.

En primer lugar debe ser estudiada la interacción entre los ríos y los niveles freáticos circundantes para determinar el carácter ganador o perdedor del cauce. Conocer y valorar esos aportes/perdidas (ganador/perdedor) puede evitar la obtención de resultados poco precisos.

En el caso de los cauces ganadores, deben identificarse las masas de agua relacionadas así como tratar de cuantificar los aportes. Una vez identificadas las masas de agua deberá procederse a la identificación de un perímetro de protección, que limite las extracciones del acuífero, así como las actividades permitidas en la zona (evitando así potenciales contaminaciones difusas).

Para los cauces perdedores es importante también el conocimiento de la hidrogeología de la zona para cuantificar el porcentaje de perdidas en favor del acuífero. En casos extremos podría valorarse la limitación de estas aportaciones una vez identificadas las zonas de recarga natural.

En ambos casos, la recarga artificial de acuíferos aparece como una solución para garantizar la estabilidad de los caudales ambientales. En el caso de los cauces ganadores, las subidas de los niveles freáticos generados por la recarga propiciarán mayores aportes al cauce, que pueden ser de gran valor en el caso de estiajes muy acusados Los cauces perdedores responderán también positivamente a la recarga artificial de acuíferos, puesto que la subida de niveles freáticos propiciará menores gradientes hidráulicos entre el cauce y el acuífero, limitando así de modo natural las aportaciones.

Consideraciones finales

Una vez consultada la bibliografía existente, se plantean una serie de dudas y conclusiones que deben ser consensuadas. Estas son las siguientes:

- Debe clasificarse los tramos de río, así como decidir que clasificaciones van a considerarse como prioritarias

- Debe definirse con precisión el nivel de detalle del estudio, y cuales son las principales especies objetivo de los diferentes tipos de cauces.

- Debe decidirse si se van a evaluar tramos concretos o cuencas en su conjunto.

- En todas las zonas que se quieran evaluar es necesario disponer de una lista actualizada de todas las concesiones de extracción de agua de los cauces, así como un inventario de presas y minicentrales.

La determinación de los caudales debe aunar además de los criterios mencionados anteriormente, objetivos geomorfológicos, riparios, de calidad de las aguas, de fauna silvestre del ecosistema fluvial, fauna silvestre del ecosistema fluvial litoral (en su caso), cantidad y calidad de las aguas subterráneas, valores paisajísticos, usos sociales/recreativos, etc.

CAUDALES AMBIENTALES. CONSIDERACIONES LOCALES PARA LOS CASOS DEL CARRACILLO Y CUBETA DE SANTIUSTE. Por Óscar Martínez Tejero.

Ambas zonas están encuadradas sobre la masa de agua “Los Arenales”. En el caso de la zona del Carracillo son caudales del río Cega, mientras que en el caso de la Cubeta de Santiuste, los caudales de recarga son retraídos del río Voltoya.

En ambos casos, con el paso del tiempo, se ha ido poniendo de manifiesto que pueden no haberse tenido en cuenta diversos factores para la evaluación de los caudales ambientales en zonas de cabecera.

El Art. 59.7 del Texto Refundido de la Ley de Aguas (TRLA) de 20 de Julio de 2001, establece que los caudales ecológicos se fijarán en los Planes Hidrológicos de Cuencas. El Plan Hidrológico del Duero data del año 1998 y esto puede haber generado ciertas carencias en la valoración de los caudales ambientales.

La mayor parte de las estimaciones iniciales se realizaron en base a métodos hidrológicos, las cuales no tienen en cuenta las cuestiones ambientales.

Actualmente la técnicas MAR ponen de manifiesto, en relación a los caudales ambientales, que si bien son eficaces desde el punto de vista de la recarga artificial, deben ir acompañadas de una ordenación estricta del territorio y de los recursos hídricos detraídos al acuífero, de lo contrario, carecen de sentido desde un punto de vista global.

A continuación pasamos a describir la casuística y situación actual de cada una de las zonas.

LA EXPERIENCIA DE LA COMARCA DEL CARRACILLO

La comunidad de regantes de esta zona, la cual lleva el mismo nombre, disfruta de una concesión del río Cega desde el año 1999. Esta concesión es de un máximo de 6 hm^3, transferibles desde enero hasta abril, ambos inclusive. El caudal ambiental del río estaba establecido en 6.898 l/s

La evolución de las superficies regadas por la C.R. ha sido desde 3.700 ha en el período 97/01, 5.756 ha en el 2005 y finalmente se alcanzan las7.708 ha en el año 2007.

Según datos disponibles, los caudales detraídos para la recarga artificial han sido en los últimos años:

Año	hm^3
02/03	0,5
03/04	5,5
04/05	0
05/06	1,85
06/07	2,1
07/08	0
08/09	1,6

Tabla 4-02. Caudales extraídos al río Cega para la recarga artificial.

Actualmente se ha aprobado una ampliación de la concesión hasta los 14 hm^3, ampliando un mes más el periodo de recarga. Queda por tanto incluido el mes de diciembre.

Del mismo modo, el caudal ambiental del Cega en este tramo queda establecido en 1960 l/s.

La mencionada nueva regulación pone de manifiesto las siguientes cuestiones:

- La nueva dotación consolidará 7.700 ha de regadío.
- La estimación del nuevo caudal ambiental ha sido llevada a cabo mediante métodos hidrológicos. Para ello se han utilizado datos de la estación de pajares de Pedraza (nº 16), los cuáles contaban con series de más de diez años de caudales medios diarios.
- Para calibrar los datos se tuvo en cuenta la estación de aforos de Lastras de Cuellar (nº 174). Esta estación de aforo presentaba datos desde el 2004/2005 hasta la fecha de realización del estudio (2007).
- Se estimó que no existen cauces importantes entre ambas estaciones que aporten recursos al río.
- Existen zonas aledañas, pertenecientes a la Red natura 2000, como son el complejo lagunar de lastras de Cuellar y las lagunas de Cantalejo, así como las riberas del Cega.
- Existen en el tramo afectado especies recogidas en el Anexo II de la directiva hábitat (92/43/CEE).
- Existe ictiofauna vulnerable, incluso citada en el libro rojo de los vertebrados, como la trucha común, el gobio, la bermejuela y la pardilla.
- Como requisito para el aumento de la concesión se instó al promotor a la construcción de una escala de peces, ya que la reducción del caudal mínimo podría afectar a la migración, de los salmónidos fundamentalmente, en época de freza.

A la vista de las cuestiones anteriores se observa la falta de ligazón entre las técnicas MAR y los criterios de establecimiento de caudales mínimos, así como de planificación de regadíos.

Dados los condicionantes ambientales que existen, habría que plantear una evaluación de caudales ambientales más completa que la que pueden ofrecer los métodos hidrológicos. En efecto, una metodología de simulación de hábitat (IFIM) debería aplicarse a la zona para validar de modo efectivo el nuevo caudal ambiental propuesto. Para ello habría que seleccionar las "especies objetivo" más afectadas potencialmente por la detracción de caudales.

Del mismo modo también se puede observar que los datos de la estación de Lastras de Cuellar no cuentan con la amplitud suficiente, además de coincidir con un ciclo bastante acusado de sequía.

Los métodos hidrológicos que establecen porcentajes sobre los caudales base, son muy sensibles a los ciclos de sequía. Habría que ampliar la serie de datos para diluir los efectos de los ciclos húmedos y secos en la estimación. De todos modos, la opción más recomendable pasaría, aparte de por la aplicación de los métodos de simulación de hábitat, por el establecimiento de dos caudales ambientales; Uno para ciclos secos, cada vez más frecuentes, y otro para ciclos húmedos.

LA CUBETA DE SANTIUSTE DE SAN JUAN BAUTISTA

Como ya se ha comentado anteriormente, la masa de agua de los arenales en esta zona es recargada en la cubeta de Santiuste mediante las aguas del río Voltoya.
Los últimos datos de caudales derivados son:

Año	hm^3
02/03	3,50
03/04	2,25
04/05	1,26
05/06	5,11
06/07	12,68
07/08	0,53
08/09	4,35

Tabla 4-03. Caudales extraídos al río Voltoya

Respecto a los datos sobre caudales ambientales del Voltoya, no se conoce ningún estudio en el que se hayan empleado los métodos de simulación de hábitat, por tanto es esperable que también se hayan utilizado métodos hidrológicos. Como ya se comentó en su momento, estos métodos son interesantes en el caso de grandes cauces (se emplea con éxito en el Duero), pero tiene ciertas limitaciones en cauces de pequeño tamaño como el Voltoya.

El único dato disponible está en el Plan Especial de Sequías en la Cuenca del Duero, de la DHD, el caudal ecológico recomendado aguas abajo del Embalse del Voltoya (o de Serones) para el río Voltoya es de 2 m^3/s con un caudal mínimo de 0,1 m^3/s y un caudal aconsejable de 0,2 m^3/s.

Tampoco se dispone de datos sobre la evolución de la superficie de la comunidad de regantes, ni se tiene constancia de que se haya ampliado la concesión original de 1998. Si bien es cierto que, a priori, esta zona no cuenta con el valor ecológico de las riberas del Cega, habría que realizar una simulación de hábitat para estimar las afecciones aguas abajo. Del mismo modo sería interesante interrelacionar el estado actual de eutrofización del embalsa de serones con los caudales retraídos al río para la recarga.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcázar Montero, J. “El método del caudal básico para la determinación de caudales de mantenimiento aplicado para la cuenca del Ebro”. Tesis doctoral.
- Castro Heredia, L.M, Carbajar Escobar, Y. y Monsalves, E.A. “Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental”.
- García de Jalón Lastra, D. “Regimenes de caudales ecológicos o de compensación: El método IFIM o del APU”.
- Manual de usuario de Phabsim.
- Manual de usuario de River 2D.

CAPÍTULO 5. GEOGRAFÍA, SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, CARTOGRAFIA Y TELEDETECCIÓN

GESTIÓN DE LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS. PROCESOS DEDUCTIVOS CON APOYO DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO (SIG). DEFINICIÓN DE LAS "ZONAS MAR" EN LA GEOGRAFÍA ESPAÑOLA Y EL HIDROGEOPORTAL DINA-MAR. Por Mª Ángeles San Miguel Fraile y Fernando Sánchez Serrano.

En este capítulo se describen todos los procesos relacionados con la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS) en cuanto a la deducción de las zonas de España favorables para aplicar técnicas de Gestión de la Recarga de Acuíferos, que han sido designadas "Zonas MAR", el proceso para deducir el tipo de dispositivo más idóneo para cada una y la incorporación a un visor cartográfico, que se ha designado el "Hidrogeoportal". Para el primero de los procesos se han empleado hasta 82 capas y coberturas temáticas, mientras que el segundo se ha realizado con 18. La componente principal de I+D ha estado en la deducción de la secuencia deductiva más idónea de todas las posibles, generando un nuevo proceso.

DEFINICIÓN DEL ÁMBITO DE ESTUDIO

En este trabajo se van a estudiar las zonas susceptibles para recarga artificial de acuíferos del territorio español en la península y Baleares.

En una primera aproximación se parte del límite nacional y se seleccionan los recintos de superficie superior a 10 Km², con este proceso la zona de estudio se circunscribe al territorio peninsular y a las cinco islas mayores de Baleares.

De todo este territorio, las áreas más convenientes para la recarga artificial de acuíferos van a ser las áreas próximas a la red hidrográfica principal, que se definen a partir de las capas de embalses de la BCN200 y humedales, ríos del CEDEX para la península, ríos de la BCN200 de Baleares y puntos de aforo en los ríos del CEDEX.

ZONAS DE INFLUENCIA EN TORNO A LA RED HIDROGRÁFICA

Los puntos de aforo se han utilizado para asignar el caudal a los ríos. No todos los tramos tienen datos de caudal y además en algunos tramos hay dos datos diferentes. Los tramos con más de un dato de caudal se reparten mediante el cálculo de polígonos de Thiessen. A los tramos sin dato se les asigna caudal mediante los pasos siguientes:

- Si uno o más tramos no tienen caudal, pero están conectados con dos tramos de la misma corriente con dato, se les asigna un caudal medio de ambos datos.

- Si un tramo no tiene caudal, pero está conectado con otro tramo de la misma corriente con dato, se le asigna el mismo caudal.

- En los ríos que tienen sólo un dato de caudal se extrapola hacia el nacimiento y hacia la desembocadura

- A los afluentes sin dato se les asigna un 10% del caudal del río al que vierten, si éste tiene dato.

- En el caso de los ríos principales se les asigna un 10% del caudal del río en el curso alto y un 5% del caudal del río en el curso bajo. En el Ebro se asigna un 1% en los ríos sin dato a partir del curso medio y bajo.

- A los ríos sin dato o conectados con otros sin dato no se les asigna caudal.

Tras este cálculo, los ríos se clasifican en cinco categorías en función del caudal:

1: 0 - 0,45
2: > 0,45 - 1,65
3: > 1,65 - 7,26
4: > 7,26 - 27,5
5: > 27,5

Tras establecer esta clasificación, se calculan las zonas de influencia con 5 rangos de longitud, de 1 a 5 kilómetros, según la categoría del río.

Además de los ríos, se han calculado las zonas de influencia de embalses. Se ha partido de los embalses de la BCN200. En el caso en que un embalse estuviera también en la capa de humedales se ha tomado el perímetro del humedal. Para estos elementos se ha calculado una zona de influencia de 1 kilómetro.

La zona inicial de estudio va a ser la unión de zonas de influencia de ríos y embalses.

REDUCCIÓN O REAJUSTE DE LAS "ZONAS MAR" O ZONAS DE RECARGA

Tras la definición de las zonas de influencia de ríos y embalses, se eliminan las zonas que cumplen una o más de las condiciones detalladas a continuación:

- No se superponen sobre un acuífero, definidas a partir de la capa de acuíferos interés

- Pendiente superior al 50%, calculada con el modelo digital del terreno de 100 metros

- Zonas de permeabilidad baja o muy baja, del "Mapa litoestratigráfico y de permeabilidad de España" 1:200.000 del MMA, 2006

PROCESO DE ANÁLISIS. TEMAS CONSIDERADOS

En esta fase se incorporan todas las capas que se van a considerar en el proyecto, se genera información nueva a partir de estas capas y se construye la base de datos que se precisa para determinar cuales son los dispositivos más adecuados para cada zona.

El resultado final es una capa con todos los factores que intervienen en el análisis y un campo para cada uno de los dispositivos MAR. Este campo contiene los valores más altos en las zonas más favorables y los menores en las zonas menos favorables para el dispositivo que se analice.

Como se va a analizar una gran cantidad de información, se va a tratar la información como grid, para lo cual se van a convertir las capas vectoriales a grids de dimensión de 100 metros.
Todas las capas van a tener el mismo origen y número de celdas. El trabajo se va a realizar con el sistema de información geográfico Arc/Gis de Esri, versión 9.3.

Las capas definitivas empleadas en el proceso han sido:

1. AFLORAMIENTOS PERMEABLES
2. GEOLOGÍA DE ESPAÑA
3. RED DE CONTROL DE NITRATOS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS
4. ZONAS DECLARADAS VULNERABLES EN 2005
5. REGADÍOS DEL PLAN NACIONAL DE REGADÍOS
6. POLÍGONOS CONCÉNTRICOS DISTANTES HASTA 2 KILÓMETROS DE LOS EMBALSES
7. POLÍGONOS CONCÉNTRICOS DISTANTES DE 1 A 5 KILÓMETROS DE LOS RÍOS
8. RIESGO DE INUNDACIÓN
9. PENDIENTE
10. ÁREAS DISTANTES HASTA UN KILÓMETRO DE LOS HUMEDALES
11. ÁREAS DISTANTES HASTA UN KILÓMETRO DEL TRASVASE TAJO-SEGURA
12. CALIDAD DE LAS AGUAS. CONDUCTIVIDAD
13. ZONAS DE INFLUENCIA DE MINAS EN ACUÍFEROS
14. USOS DEL SUELO SEGÚN CORINE
15. NATURALIDAD DEL TERRITORIO SEGÚN CORINE
16. BUFFER DE LAS ÁREAS URBANAS DETALLADAS
17. PIEZOMETRÍA SUPERFICIAL
18. PIEZOMETRÍA PROFUNDA
19. MASAS FORESTALES A ESCALA 1:50.000
20. UNIDADES HIDROLOGICAS SUSCEPTIBLES DE RECARGA ARTIFICIAL SEGÚN EL IGME
21. BUFFER DE ESTACIONES DEPURADORAS Y HABITANTES EQUIVALENTES.

22. BUFFER DE ESTACIONES DEPURADORAS POR LAGUNAJE.
23. BUFFER DE PUNTOS DE CONTROL DE INTRUSIÓN MARINA.
24. DISTANCIA A LA COSTA
25. RANGO ALTITUDINAL
26. ZONAS ÁRIDAS
27. SUBCUENCAS CON EXCEDENTES HIDRICOS
28. SISTEMAS DUNARES SEGÚN CORINE

Su aplicación se describe de manera individualizada a continuación:

1- Afloramientos permeables (Mapa litoestratigráfico y de permeabilidad de España, Ministerios de Educación y Medio Ambiente, 2006).

La información original está publicada en un DVD, con una serie de capas por cuenca hidrográfica en formato *shape*. La proyección es UTM ED50, huso 30 extendido.

El shape de permeabilidad es clplit.shp. Se han unido todas las cuencas para tener toda la información en una capa y finalmente se convierte a ráster.

El campo que vamos a usar en este aspecto es:

PERME: permeabilidad. Los valores de permeabilidad posibles son:

MUY ALTA
ALTA
MEDIA
BAJA } estos dos valores no interesan a efectos de recarga
MUY BAJA }

2- Geología de España (Mapa litoestratigráfico y de permeabilidad de España, Ministerios de Educación y Medio Ambiente, 2006)

La información es la misma que en el punto 4.1. Los campos que vamos a usar en este aspecto son:

DLO: Descripción litoestratigráfica de detalle
DCO: Agrupa la descripción de material genérica y la permeabilidad.

Se va a añadir un campo nuevo, glito, para codificar el valor del grupo litoestratigráfico. Los valores de este campo son:

ALUVIAL
DETRITICO
KARSTICO
METAMÓRFICO
VOLCÁNICO
INTRUSIVO
EVAPORÍTICO

3- Red de control de nitratos en las aguas subterráneas (Ministerio de Medio Ambiente, 2000)

La información original es una capa de puntos en formato shape. La proyección es UTM, ED50, huso 30 extendido.

El campo que nos interesa es:

NO_3: concentración de nitratos.

Para que esta información tenga forma de superficies se realizan los procesos:

- Conversión a ráster. El sistema asigna a cada celda un valor de concentración de nitratos en función de lo que tiene alrededor.

- Estratificado:
  1: < 50
  1: ≥ 50

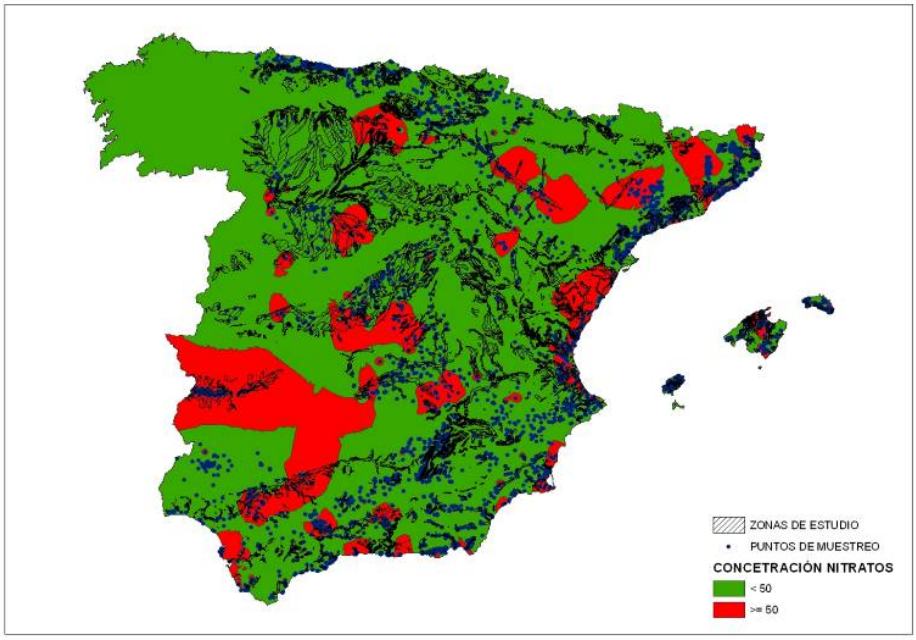


Figura 5-01: Cálculo concentración de nitratos.

4- Zonas declaradas vulnerables en 2005 (Tragsatec, 2005)

La capa de partida es un shape de polígonos de zonas vulnerables. Originalmente es una capa de puntos en formato shape. La proyección es UTM, ED50, huso 30 extendido.

Los campos asociados son:

VUL_NOM: Nombre de la zona
VUL_COM: Comunidad autónoma en donde se localiza la zona
ID_ZONA: Identificador.

Se le añade el campo:

NZON_VULNE:

0: Zona no vulnerable
1: Zona vulnerable.

A partir de este campo se convierte a ráster.

5- Regadíos del Plan Nacional de Regadíos (Plan de Vigilancia Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente, 2003)

La información de partida está en formato shape y en formato cobertura. La proyección es UTM, ED50, huso 30 extendido.

La base de datos asociada es compleja, pero para el análisis de la recarga nos interesa el campo que describe el origen del agua:

RG_O_AGUA: con los valores posibles de:

1: Superficiales
2: Subterráneas
4: Retornos
5: Depuradoras
6: Desalinizadoras.

Se convierte a grid mediante el atributo rg_o_agua.

6- Polígonos concéntricos distantes hasta 2 kilómetros de los embalses (Tragsatec, 2008)

Se crea a partir de los embalses de la BCN. La proyección es UTM, ED50, huso 30 extendido.

Se utiliza la herramienta “buffer”, con una distancia de 2 kilómetros. Se asigna una codificación:

0: zona distancia superior a 2 Km.
1: Zona distancia hasta 2 Km.

Y finalmente se convierte a grid.

7- Polígonos concéntricos distantes de 1 a 5 kilómetros de los ríos (Tragsatec, 2008)

Se crea a partir de los ríos del CEDEX para la península y de los ríos de la BCN en Baleares. La proyección es UTM, ED50, huso 30 extendido.

Para construir esta capa se crean primero 5 capas con los buffer de 1 kilómetro, de 2, de 3, de 4 y de 5 kilómetros de radio de la envolvente. Se unen estas capas y se crea una con los campos "anillo" y desanillo, con los valores posibles de

0: Zona a distancia superior a 5 kilómetros
1: Zona de 0-1 Km. en torno a los ríos.
2: 1-2 Km.
3 2-3 Km.
4: 3-4 Km.
5: 4-5 Km.

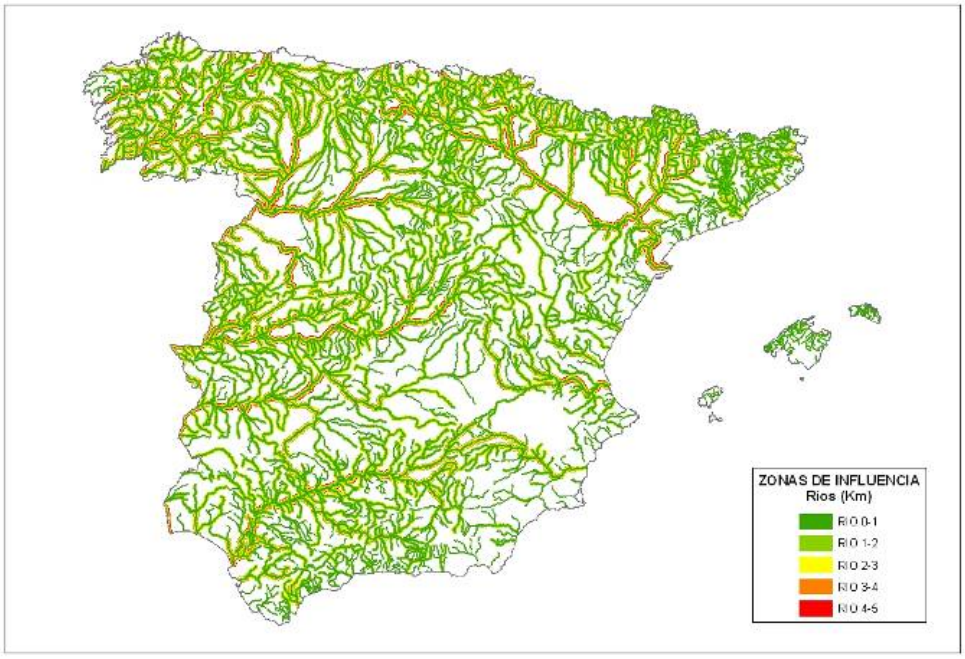


Figura 5-02: Polígonos concéntricos entorno a ríos.

8- Riesgo de inundación (Tragsatec, 2007)

Se crea a partir de los ríos del CEDEX con el dato de riesgo de inundación asociado. La proyección es UTM, ED50, huso 30 extendido.

Para construir esta capa se cruzan los ríos del CEDEX con las subcuencas también del CEDEX, a cada subcuenca se le asigna el riesgo máximo de los ríos que la atraviesan.

9- Pendiente (Tragsatec, 2007)

Se calculan a partir del modelo digital del terreno de 100 metros de resolución. La proyección es UTM, ED50, huso 30 extendido.

Se calcula la pendiente, se estratifica y se convierte a vectorial suavizando. Los intervalos de pendiente con los que trabajamos, expresados en porcentaje, son:

1: 0 – 10 %
2: 10 – 20
3: 20 – 30
4: 30 – 40
5: 40 – 50
6: > 50

A efectos de recarga artificial, se eliminan las áreas de pendiente superior al 50%. Los otros intervalos se construyen para su valoración en los distintos métodos de recarga.

10- Áreas distantes hasta un kilómetro de los humedales (Tragsatec, 2007)

Calculadas a partir de la capa de humedales. La proyección es UTM, ED50, huso 30 extendido.

Si una zona esta dentro de esta área se valora de forma diferente para la recarga artificial, si no esta en esta zona de influencia de humedales el cálculo de los dispositivos de recarga no se verá afectado.

11- Áreas distantes hasta un kilómetro del trasvase Tajo-Segura (Tragsatec, 2007)

Calculadas a partir de la línea del trasvase Tajo-Segura. La proyección es UTM, ED50, huso 30 extendido.

Esta capa funciona de forma similar a la anterior, si una zona esta dentro de la zona de influencia de 1 kilómetro del trasvase influirá en el cálculo de dispositivos, en caso contrario no.

12- Calidad de las aguas. Conductividad. (Tragsatec, 2007)

Se crea a partir de la información de calidad de las aguas, asociada a las unidades hidrológicas y del atributo de conductividad. La proyección es UTM, ED50, huso 30 extendido.

Se han considerado dos franjas:

1: conductividad < 2500
2: conductividad > 2500

13- Zonas de influencia de minas en acuíferos. (Tragsatec, 2007)

Se calculan las zonas de influencia de 2 kilómetros en torno a la capa de minas en acuíferos. La proyección es UTM, ED50, huso 30 extendido.

Si una zona esta dentro de la zona de influencia de 2 kilómetros de una mina influirá en el cálculo de dispositivos, en caso contrario no.

14- Usos del suelo según CORINE. (IGN, Ministerio de Fomento, 2000)

Se definen a partir del Corine los usos del suelo de: Forestal, prados y pastos y subdesértico.

Estos usos del suelo se construyen a partir del código de 3 dígitos, y son los siguientes:

CORINE(3 dígitos)	DESCRIPCIÓN CÓDIGO	USO DE SUELO
311	Bosques de frondosas	FORESTAL
312	Bosques de coníferas	FORESTAL
313	Bosque mixto	FORESTAL
322	Landas y matorrales mesófilos	FORESTAL
323	Matorrales esclerófilos	FORESTAL
324	Matorral boscoso de transición	FORESTAL
231	Prados y praderas	PRADOS Y PASTOS
321	Pastizales naturales	PRADOS Y PASTOS
331	Playas, dunas y arenales	SUBDESERTICO
332	Roquedo	SUBDESERTICO
333	Espacios con vegetación escasa	SUBDESERTICO

En el proceso de cálculo se añade el campo uso, se calcula su valor de acuerdo con la descripción citada y se disuelve por este campo. Finalmente se convierte a ráster.

15- Naturalidad del territorio según CORINE. (IGN, Ministerio de Fomento, 2000)

Se clasifica el territorio en función de la naturalidad, a partir del código de 3 dígitos y del de 5 dígitos, de acuerdo con la tabla siguiente:

CORINE	DESCRIPCIÓN CÓDIGO	NATURALIDAD
211	Tierras de labor en secano	AGRARIO
212	Terrenos regados permanentemente	AGRARIO
213	Arrozales	AGRARIO
221	Viñedos	AGRARIO
222	Frutales	AGRARIO
223	Olivares	AGRARIO
231	Prados y praderas	AGRARIO
241	Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes	AGRARIO
242	Mosaico de cultivos	AGRARIO
331	Playas, dunas y arenales	SIN VEGETACION
332	Roquedo	SIN VEGETACION
333	Espacios con vegetación escasa	SIN VEGETACION
335	Glaciares y nieves permanentes	GLACIARES Y NIEVES PERMANTES
411	Humedales y zonas pantanosas	HUMEDAL
421	Marismas	HUMEDAL
51120	Canales artificiales	INFRAESTRUCTURAS HIDRAÚLICAS
122	Redes viarias, ferroviarias y terrenos asociados	INFRAESTRUCTURAS TRANSPORTE
123	Zonas portuarias	INFRAESTRUCTURAS TRANSPORTE
124	Aeropuertos	INFRAESTRUCTURAS TRANSPORTE
111	Tejido urbano continuo	URBANO
112	Tejido urbano discontinuo	URBANO
132	Escombreras y vertederos	URBANO
133	Zonas en construcción	URBANO
141	Zonas verdes urbanas	URBANO
142	Instalaciones deportivas y recreativas	URBANO
121	Zonas industriales o comerciales	INDUSTRIAL

Tabla 4.1. Clasificación del territorio según CORINE

En el proceso de cálculo se añade el campo naturalidad, se calcula su valor de acuerdo con la tabla anterior, se disuelve por este campo y por último se convierte a ráster.

16- Buffer de las áreas urbanas detalladas. (TRAGSATEC, 2009)

Esta capa se ha construido de la siguiente manera:

Se extraen de Corine los códigos siguientes:

111	Tejido urbano continuo

112	Tejido urbano discontinuo

En el proceso de cálculo, primero se eliminan los límites internos.

Hay núcleos urbanos que se conforman en varios recintos. Se considera un único núcleo cuando las partes que forman el recinto están a 400 metros o a una distancia inferior. Se hace un "buffer" de la capa anterior y se cruza este "buffer" con ella. A cada recinto se le asigna un número, en función de la zona buffer de la que forma parte y del término municipal, de manera que habrá núcleos con una parte y otros serán multiparte.

Se asigna al núcleo de mayor superficie del municipio la población total de dicho municipio, datos del INE de 2009.

Se crea un buffer de 5 kilómetros para las núcleos de población mayor de 20.000 habitantes y un buffer de 1 Km. para los núcleos de población menor.

17- Piezometría superficial (IGME 2009)

La información de partida son las isopiezas del acuífero con su cota, los puntos utilizados con su cota y las masas de agua. La proyección es UTM, ED50, huso 30 extendido.

Se convierten estos datos a ráster y se calcula la profundidad por diferencia con el modelo digital del terreno.

Se clasifica de acuerdo con los intervalos:

1: 0 - 25
2: 25 - 50
3: 50 – 150
4: 150 -200

18- Piezometría profunda 2008. (IGME 2009)

La información de partida son las isopiezas profundas con su cota, los puntos utilizados con su cota y las masas de agua. La proyección es UTM, ED50, huso 30 extendido.

Se convierten estos datos a ráster y se calcula la profundidad por diferencia con el modelo digital del terreno.

Se reclasifica como 1 las zonas de profundidad mayor de 200 metros.

19- Masas forestales a escala 1:50.000. (Mapa Forestal de España 1:50.000, Ministerio de Medio Ambiente)

Se crea una capa de usos del suelo. La proyección es UTM, ED50, huso 30 extendido.

Se utiliza el campo del mapa usos_general que clasifica la superficie en los siguientes contenidos:

- Agua
- Arbolado
- Arbolado disperso
- Arbolado ralo
- Artificial
- Cultivos
- Desarbolado

Los bosques son los recintos con el atributo usos_general = 'Arbolado'

Se extraen del mapa estos recintos y se convierten a ráster.

20- Unidades Hidrológicas susceptibles de recarga artificial según el IGME

Es una capa de recintos extraídos de la capa de Unidades hidrológicas, que se corresponde con las zonas apropiadas para la recarga artificial, según el IGME. La proyección es UTM, ED50, huso 30 extendido.

Se convierte la capa a ráster.

21- *Buffer* de estaciones depuradoras y habitantes equivalentes. (TRAGSATEC, 2009)

Se realiza un buffer de 1 kilómetro de las estaciones depuradoras y se estratifica conforme al dato de habitantes equivalentes asociado a la EDAR. La proyección es UTM, ED50, huso 30 extendido.

Por último se convierte a ráster.

22- *Buffer* de estaciones depuradoras por lagunaje. (TRAGSATEC, 2009)

Se extrae de la capa anterior las zonas que se corresponden con depuradoras por lagunaje. La proyección es UTM, ED50, huso 30 extendido.

23- *Buffer* de puntos de control de intrusión marina. (TRAGSATEC, 2009)

Se realiza un "buffer" de los puntos de control de intrusión marina de 5 kilómetros. La proyección es UTM, ED50, huso 30 extendido.

Se convierte a ráster.

24- Distancia a costa. (Tragsatec, 2009)

Se realizan dos "buffer" hacia el interior del límite de la zona de estudio. Se consideran dos distancias: 2 kilómetros y 5 kilómetros. Se cruza con la zona de estudio y se codifica. La proyección es UTM, ED50, huso 30 extendido.

La codificación de esta capa va a ser:

1: Zonas de 0 a 2 kilómetros de la costa
2: Zonas de 2 a 5 kilómetros de la costa
3: Zonas a más de 5 kilómetros de la costa.

Se convierte a ráster.

25- Rango altitudinal. Tragsatec, 2009)

Se parte del modelo digital del terreno de resolución 100 metros. Se estratifica conforme a los siguientes intervalos:

1: 0 - 20
2: 20 -1500
3: > 1500

26- Zonas áridas. TRAGSATEC, 2009)

Se parte de los datos de pluviometría del Instituto Meteorológico Nacional (1960-1996), para la caracterización agroclimática de España. Se estratifica conforme a los siguientes intervalos:

1: Precipitación menor de 400 mm
2: Precipitación mayor de 400 mm

27- Estaciones meteorológicas de zonas o subcuencas con excedentes hídricos

Es una capa de recintos con las subcuencas del CEDEX con excedente hídrico. La proyección es UTM, ED50, huso 30 extendido.

Se clasifican las estaciones meteorológicas por el campo exceso_anu.

Se considera que las subcuencas con excedente hídrico son aquellas que tienen al menos una estación meteorológica con un valor superior a 100 para el campo de exceso_anu.

Se convierte a ráster.

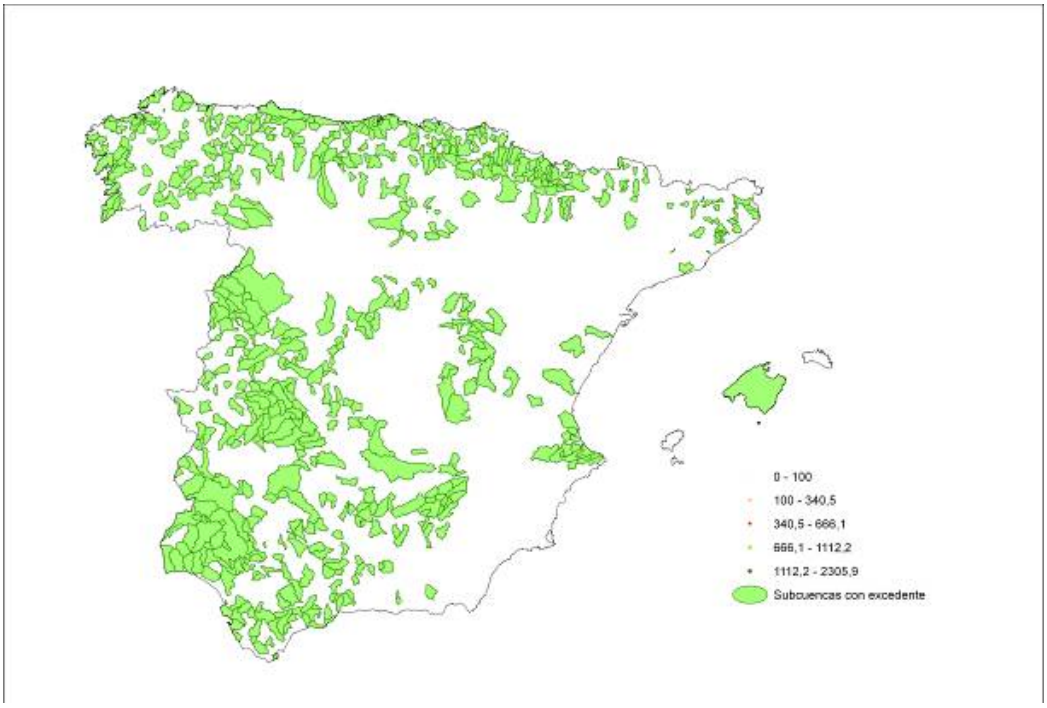


Figura 5-03. Subcuencas con excedentes.

28- Sistemas dunares según CORINE. (IGN, Ministerio de Fomento, 2000)

Se extrae de Corine el código 33110 (Playas y dunas). La proyección es UTM, ED50, huso 30 extendido.

Se convierte a ráster.

PROCESO DE ANÁLISIS. UNIÓN DE TODOS LOS TEMAS Y ASIGNACIÓN DE LOS MÉTODOS DE RECARGA ARTIFICIAL

Se unen todas las capas y se carga la tabla con el cruce de capas y técnicas de recarga.

Se calcula para cada método la puntuación.

A continuación se muestra la tabla y un ejemplo de cálculo de puntuación para un dispositivo de recarga artificial.

Tabla 5-01. Cálculo de puntuación para un dispositivo de recarga artificial (página siguiente)

TÉCNICAS Y DISPOSITIVOS DE MAR					DISPERSIÓN				CANALES								POZOS								FILTRACIÓN			LLUVIA	SUDS	
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
					BALSAS DE INFILTRACIÓN / HUMEDALES	CANALES DE INFILTRACIÓN	CANALLONES/TÉCNICAS DE TRATAMIENTO SUELO/ACUÍFERO	CAMPOS DE INFILTRACIÓN (INUNDACIÓN Y DIFUSIÓN CONTROLADA)	RECARGA ACCIDENTAL POR RETORNOS DE RIEGO	DIQUES DE RETENCIÓN Y REPRESAS	DIQUES PERMEABLES	SERPENTEOS LEVEES	ESCARIFICACIÓN LECHO	DIQUES SUBSUPERFICIALES/SUBTERRÁNEOS	DIQUES PERFORADOS	QANATS (GALERÍAS SUBTERRÁNEAS)	POZOS ABIERTOS DE INFILTRACIÓN	POZOS PROFUNDOS Y MINISONDEOS	SONDEOS	DOLINAS, COLAPSOS...	ASR	ASTR	BANCOS FILTRANTES EN LECHOS DE RÍOS (RBF)	FILTRACIÓN INTERDUNAR	RIEGO SUBTERRÁNEO	CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA EN IMPRODUCTIVO	RECARGA ACCIDENTAL CONDUCCIONES Y ALCANTARILLADO	SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE
				PESO																										
	ZONAS MAR		CÓDIGO																											
	CASUÍSTICAS 1																													
Afloramientos permeables MMA 2006		MUY ALTA	3		3	3	2	3	2	3	2	2	3	1	2	1	3	3	1	3	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1
		ALTA	2		3	3	1	3	2	2	2	3	2	1	2	1	3	3	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1
		MEDIA	1		2	2	1	1	2	2	2	1	1	1	2	1	2	2	1	1	3	3	1	2	1	1	1	1	1	1
Geología de España a escala 1:200.000, MMA 2006		ALUVIAL	1		3	3	2	3	1	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3	0	3	3	3	0	1	1	1	1	1	1
		DETRÍTICO	2		3	3	2	1	1	2	2	1	0	3	3	3	2	2	3	0	3	3	0	3	1	1	1	1	1	1
		KARSTICO	3		2	2	2	2	1	3	3	2	0	1	2	3	3	3	2	3	2	2	0	0	1	1	1	1	1	1
		METAMÓRFICO	4		0,2	2	2	0,5	1	2	2	0	0	1	3	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
		VOLCÁNICO	5		0,2	2	2	0,5	1	3	3	0	0	2	2	3	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
		INTRUSIVO	6		0,2	2	2	0,5	1	2	2	0	0	2	2	1	2	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
		EVAPORÍTICO	7		0	0	0	0	0	0,5	0	0	0	1	0,5	0,5	2	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
Red de control de nitratos en las aguas subterráneas	CONTENIDO EN NITRATOS	<50	1		1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		>=50	2		1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Zonas declaradas vulnerables 2005	1:ZONAS VULNERABLES 0:ZONAS NO VULNERABLES		1		1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Origen del agua		SUPERFICIALES	4		3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	1	3	3	1	3	1	3	1	1	2	1	1	1	1	1
		SUBTERRÁNEAS	2		0,5	0,5	1	0,5	1	0,5	0,5	0	0	1	1	0,5	0,5	0,5	0	0	1,5	1,5	1	0	2	0	0	0	0	0
		RETORNOS	4		0	2,5	1	2	3	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0,5	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
		DEPURADORAS	6		1	1	1	1	1	1	1	0	1	2	1	0	1	2	1	0,5	1	1	0	1	2	0	0	1	2	1
		DESALINIZADORAS	4		1,5	1	0	1	0	0	0	0	0	1,5	0	0	1,5	2	2	0,5	1,5	1	0	1	2	0	0	0	1	0

Se va a mostrar como se calcula la puntuación para el dispositivo D1 de recarga, balsas de infiltración.

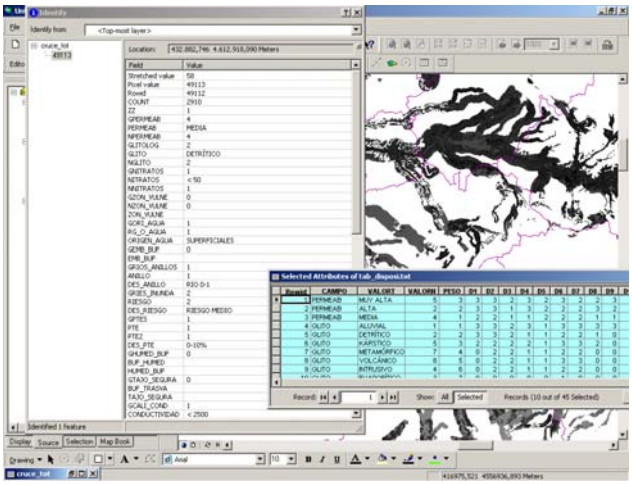


Figura 5-04. Proceso de cálculo de la puntuación para el dispositivo D1.

En primer lugar se añaden los campos D1, D2,… D24 a la capa con el cruce de todos los temas, para calcular en estos campos la puntuación para cada dispositivo.

Se conecta la tabla de cruce con la tabla de puntuación por dispositivo, primero por lo permeabilidad y se calcula D1.

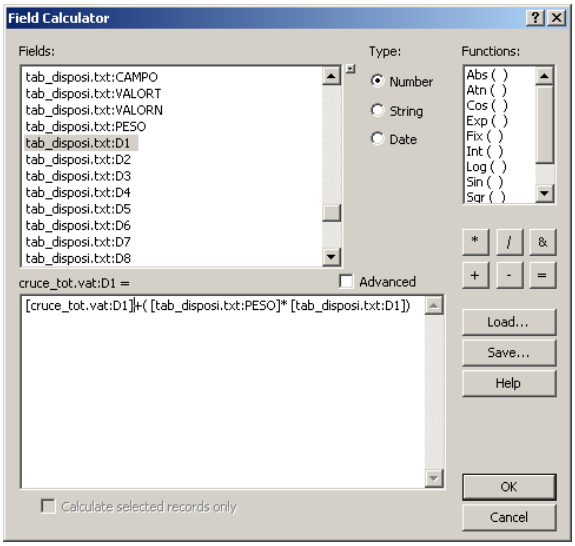


Figura 5-05. Proceso de cálculo de la puntuación para el dispositivo D1.

Se hacen sucesivos “join” por cada uno de los temas y se aplica la misma fórmula.

Se ha diseñado un proceso que calcula automáticamente una puntuación para cada método y para toda la tabla, además calcula un atributo con el dispositivo más idóneo, considerando como tal el que tenga la puntuación más alta.

VISOR WEB. EL HIDROGEOPORTAL

Como punto final se muestra la información en un visor Web desarrollado sobre Arc/Gis Server 9.3.

Se puede consultar geográficamente las capas que forman parte del análisis, así como los resultados finales, es decir, la asignación de dispositivos y el cálculo del dispositivo más óptimo.

En esta imagen se muestra una imagen general del ámbito de estudio del proyecto.

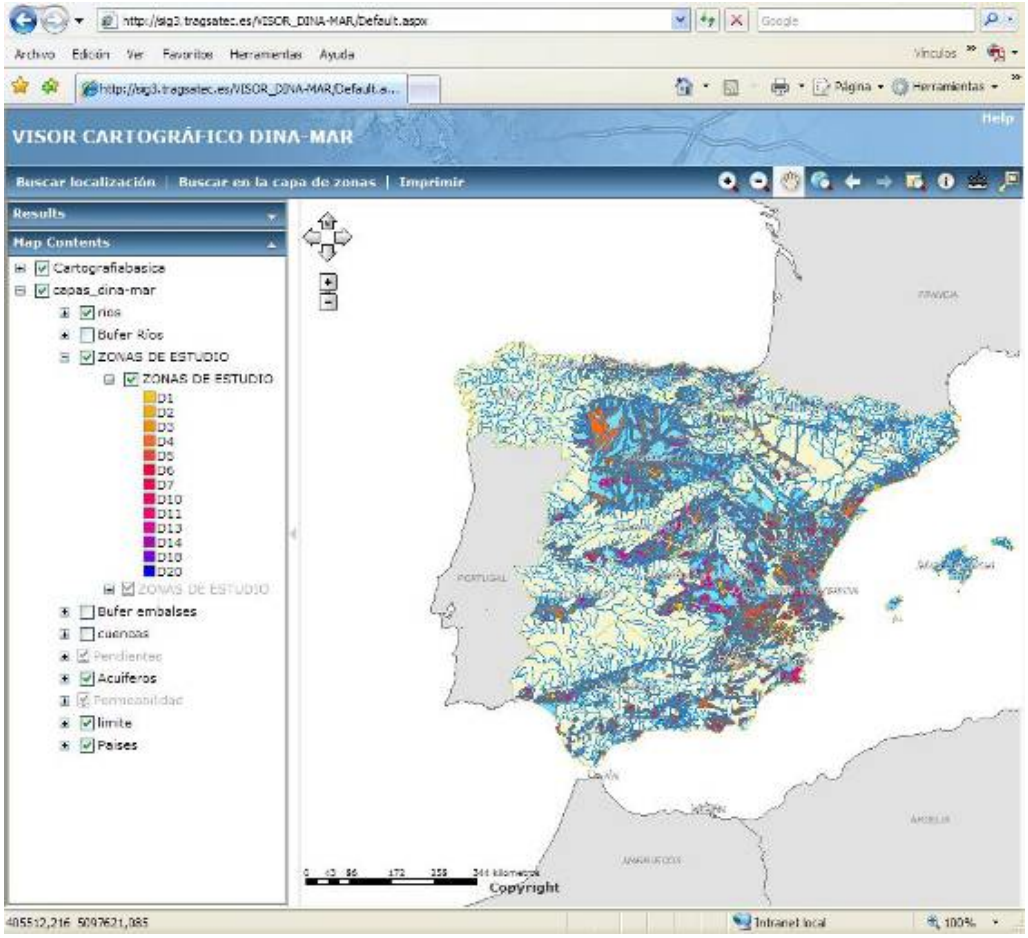


Figura 5-06. Aspecto del Visor Web o “hidrogeoportal”.

Y este es un detalle donde se puede observar el cálculo del dispositivo óptimo en un área.

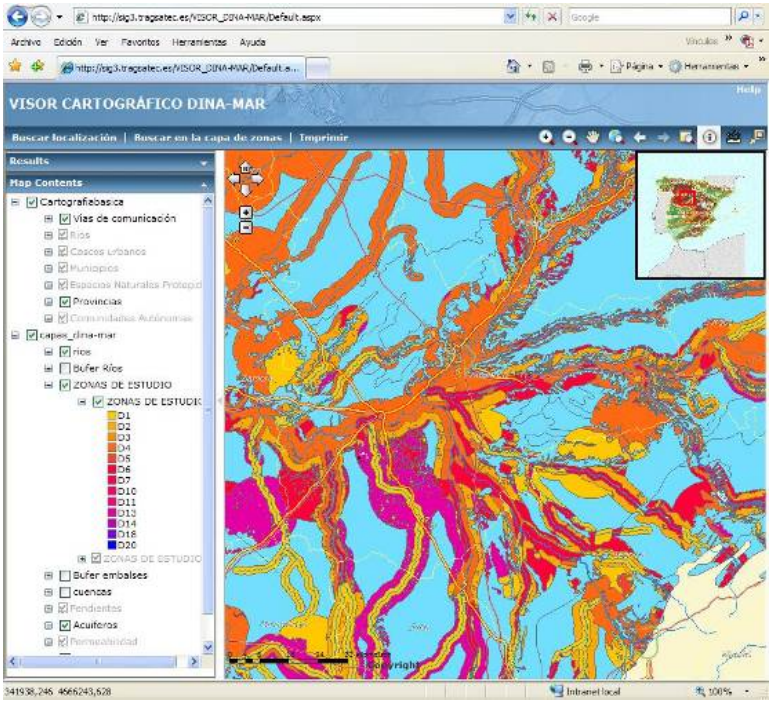


Figura 5-07. Detalle del cálculo del dispositivo óptimo.

CONCLUSIONES

Para los cálculos realizados en el proyecto se ha gestionado un volumen importante de información de diferentes procedencias y escalas.

Se han agrupado recintos de algunas capas. Se han estratificado capas a partir de atributos numéricos. Y se han realizado procesos de análisis SIG para la creación de otras capas nuevas precisadas en el trabajo.

No obstante, si bien la metodología de trabajo se puede utilizar para trabajar en una zona concreta, sería conveniente disponer también de una cartografía de más detalle para que los resultados se adapten mejor a la realidad.

BIBLIOGRAFÍA

No se ha empleado documentación específica, pero sí capas y coberturas temáticas, la mayoría de ellas oficiales, que aparecen en el listado del apartado segundo de este capítulo y cuyo origen se concreta en cada descripción.

LA TELEDETECCIÓN APLICADA A LA GESTIÓN DE LA RECARGA. EJEMPLOS PRÁCTICOS EN DOS EXPERIENCIAS APLICADAS A LA EVOLUCIÓN DE LOS CULTIVOS Y DE LOS HUMEDALES DE ESTOS SISTEMAS. Por Javier Castaños Jover.

Este apartado ha sido redactado por Javier Castaños con el apoyo del departamento de teledetección de Tragsatec.

INTRODUCCIÓN

Los datos de Observación de la Tierra, permiten analizar el estado fenológico de la vegetación de un área en un momento concreto. La respuesta a los sensores aerotransportados será mas alta cuanto mayor actividad fotosintética realice las vegetación. Es posible inferir el grado de explotación de las aguas por parte de la vegetación, especialmente en los cultivos de regadío, pero no se puede establecer el origen de las mismas (subterráneas, precipitaciones….) y tan solo permite saber el estado de los acuíferos por sus afloramientos (lagunas y humedales) atendiendo a los cambios en la altura de la lámina de agua y de la vegetación asociada al humedal.

Se ha realizado una búsqueda y recopilación de imágenes aéreas y de satélite que cubran los elementos más relacionados con las principales actuaciones de gestión de la recarga llevadas a cabo en la comarca del Carracillo y en la Cubeta de Santiuste, ambas en la provincia de Segovia y principales “zonas piloto” del proyecto de I+D+i DINA-MAR. En ellas se lleva a cabo un seguimiento desde antes de comenzar el proyecto.

En la primera se está estudiando la evolución de la zona regable desde la inauguración de los dispositivos de gestión de la recarga (antes recarga artificial), en la segunda, además de este aspecto, el trabajo se ha enfocado a la evolución de los humedales que hay en las inmediaciones del dispositivo y relacionados con él, por haber experimentado labores de regeneración hídrica mediante MAR o por ser un humedal artificial junto al canal en una zona de sustrato impermeable (facies Cuestas), como es el caso del Sanchón entre Santiuste y Coca.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se han comparado las fotografías aéreas de 1977 y 1984 y la ortoimagen de SIGPAC de 2006. Con las imágenes de satélite, se han confrontado una imagen Landsat de 1991, 2000 y 2007, así como la imagen del Plan Nacional de Teledetección SPOT5 del año 2005.

También se ha estudiado las analogías y la evolución de estos elementos clave comparando las ortofotos de los años 1977-1984-1991-2006.

Intervención en la Comarca del Carracillo

La búsqueda de datos de Observación de la Tierra se realizó en tres fuentes: el archivo corporativo de imágenes de Tragsatec, imágenes aéreas en el servidor de imágenes del CNIG http://www.cnig.es:8081/visir2/visualizador.asp e imágenes de satélite Landsat en el servidor de imágenes de la NASA http://glovis.usgs.gov/.

Se han recopilado y analizado imágenes en diferentes resoluciones: imágenes aéreas a distintas escalas, ortofoto de SIGPAC a 0,5 metros e imágenes de satélite a Ikonos a 1m, SPOT a 2.5m y 20m y Landsat a 30m.

A continuación se muestran los ejemplos más relevantes de la actuación (figuras 5-08 a 5-10).

Figura 5-08. Imagen área (2002) sobre el área de actuación, disponible en el archivo del CNIG. Dehesa Boyal, extremo Este de la Comarca.

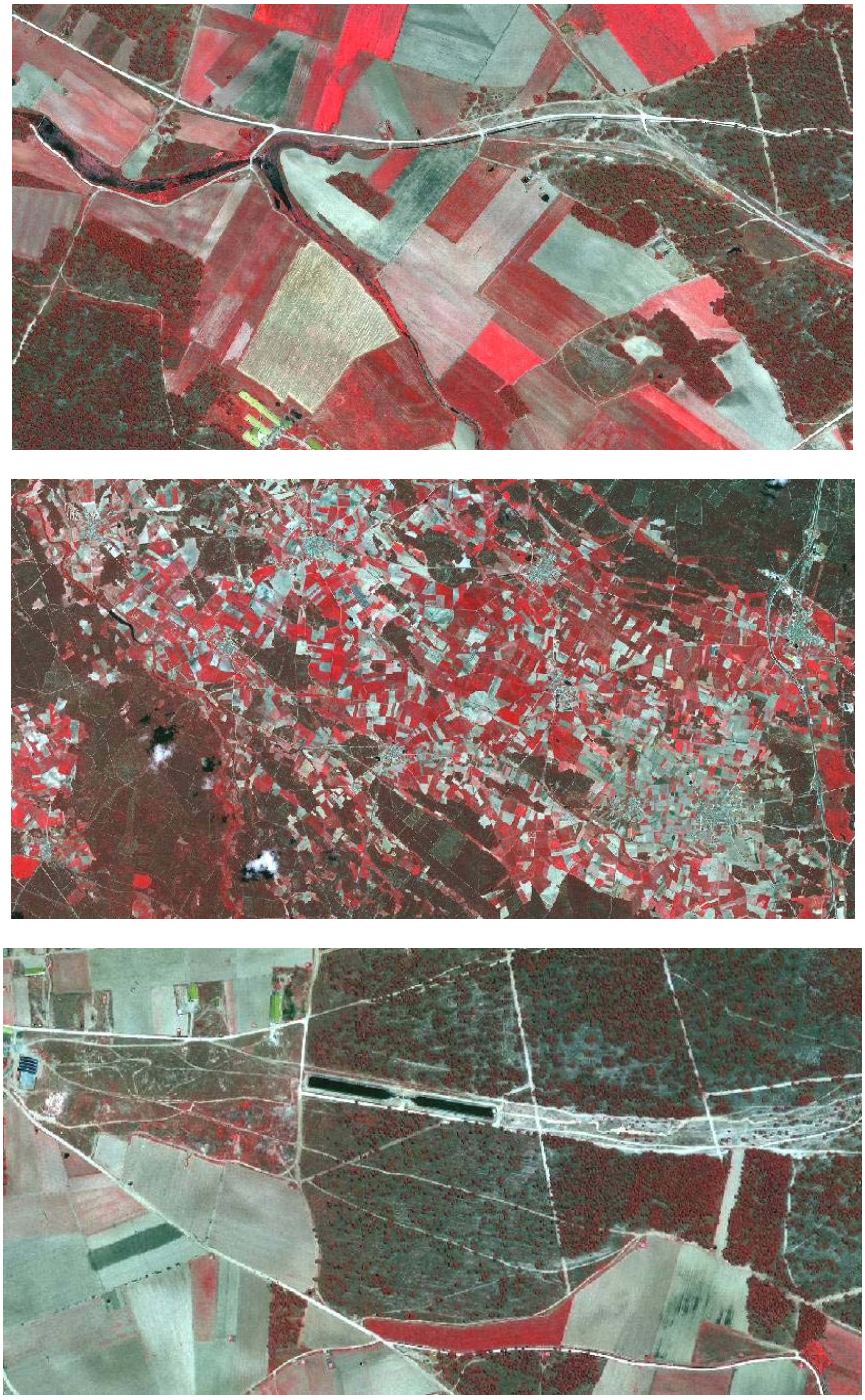
Figura 5-09. Imagen de mayo de 2010 Ikonos de fusión en Color Natural sobre la zona de actuación y detalle sobre una de las zonas de actuación. Balsas de Gomezserracín.

Figuras 5-10 a) y b). Imágenes de mayo de 2010 Ikonos de fusión en Color Natural e Infrarrojo sobre la zona de actuación (extremo oeste de la Comarca).

Por su parte en la ortofoto de SIGPAC se observa las obras de acometida realizadas en el área, cuando comparamos años anteriores a la intervención con imágenes actuales.

Figuras 5-11 a) a c). Situación previa a la actuación en el área de Carracillo, año 2004 (ortofoto de SIGPAC (0.5 m)).

Figuras 5-12 a) a c). Situación tras la actuación en el área de Carracillo, año 2008 (ortfoto de SIGPAC (0,5 m)).



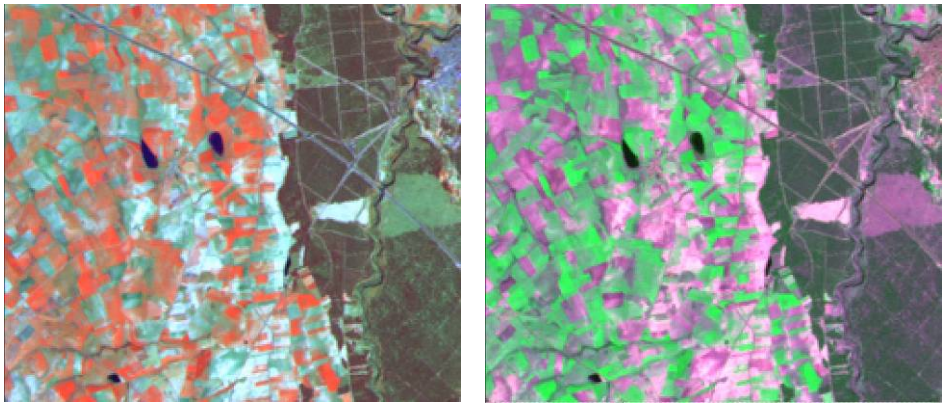
Figuras 5-13 a) a c). Situación tras la actuación en el área de Carracillo, año 2010 (Fusión Ikonos en Falso color infrarrojo (1m)).

Evolución de los humedales de la Cubeta de Santiuste

En este caso concreto se han recopilado distintas ortoimágenes y fotos aéreas de los humedales más asociados a las operaciones de gestión de la recarga que se llevan a cabo en la Cubeta de Santiuste, la laguna de la Iglesia (laboratorio experimental del proyecto DINA-MAR), la laguna de las Eras y el humedal artificial del Sanchón.

Al igual que en el caso precedente, se han buscado ortofotos de SIGPAC a 0,5 metros e imágenes de satélite a 2,5, 20 y 30m.

Figuras 5-14 a) y b). Cubeta de Santiuste. Imágenes del Plan Nacional de Teledetección. Julio 2005 SPOT 5, infrarrojo y color natural respectivamente.



Figuras 5-15 a) y b). Imagen Landsat 5 TM fechada el 18 de marzo de 2007. Se observa como en primavera los tres humedales (dos naturales y uno artificial están inundados).

Figuras 5-16 a) y b). Imagen aérea 1977 (CNIG) y Ortofoto SIGPAC (0.5m).

Figuras 5-17 a) y b). Imagen SPOT 5 PNT (2.5m) e Imagen Landsat 5 TM (30m).

Se observa en la ortofoto adjunta las obras de acometida realizadas en el humedal artificial del Sanchón (al Sur de la imagen).

Figura 5-18. Ortofoto con el trazado del canal de MAR y los humedales de las Eras y de la Iglesia, margen superior y de izquierda a derecha.

Figura 5-19. Detalle de la balsa de recarga / humedal artificial del Sanchón.

CONCLUSIONES

Las imágenes analizadas, en este caso, no han permitido ver la evolución agroambiental de estos humedales y el área afectada por los mismos, puesto que la mayor parte de las imágenes disponibles actualmente en Tragsatec se corresponden con la estación de verano y estos humedales se encuentran secos. En una de las imágenes de las que se dispone presenta estos humedales inundados, correspondiéndose con una imagen Landsat 5 de 30 m de marzo de 2007 y en la ortofoto de 2008.

Tanto en materia de regadíos como en cuanto a la evolución de los humedales se refiere, las actuaciones de gestión de la recarga conllevan la aparición de nuevas zonas regables y de humedales artificiales, indicadores visuales no tanto del nivel de llenado del acuífero sino más bien de su grado y tipo de explotación.

La evolución de la superficie regada resulta más indicativa de los usos del agua que de la evolución del nivel de llenado del acuífero en observaciones a esta escala.

La evolución de los humedales naturales, en cambio, sí reflejan con mayor precisión los resultados de la actuación, si bien, su escala y magnitud no permiten apreciar la evolución de cada sistema con detalle.

A tenor del trabajo realizado, se concluye en que todos estos datos aportan una información demasiado puntual y estable de las actuaciones, si bien constituyen una primera aproximación de gran utilidad para estudios de detalle.

BIBLIOGRAFÍA

No se ha empleado bibliografía específica, pero sí fotografías aéreas, ortofotos, ortoimágenes Landsat y SPOT5 especificadas en el apartado de materiales y métodos.

CAPÍTULO 6. LA ARQUITECTURA Y LA HIDROGEOLOGÍA URBANA EN MATERIA DE GESTIÓN DE LA RECARGA

SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS). GESTIÓN DEL AGUA Y CIUDAD. Por Ignacio Prieto Leache.

Este capítulo responde al enfoque arquitectónico de la hidrogeología urbana, y cómo influye la edificación en el flujo subterráneo bajo las ciudades, con propuestas concretas para minimizar el impacto generado. Ha sido redactado por el arquitecto Ignacio Prieto.

INTRODUCCIÓN

La actual conciencia medioambiental frente al problema de la desertización y cambio climático permiten entender el momento como una oportunidad para cambiar modelos obsoletos no sostenibles y plantear soluciones que modifiquen la manera de construir y utilicen un recurso cada vez más escaso como es el agua de modo adecuado.

Figura 6-01 a) y b). Inundaciones en distintas ciudades españolas. Fotos: http://www.elmundo.es

En un modelo de ciudad donde el recurso del agua se distribuye un 5% para consumo, 10% para industria y 85% para riego, es necesario modificar los parámetros urbanos y reducir las necesidades hídricas mediante todas las técnicas posibles.

Significa romper esquemas asimilados poco adecuados y proponer un modelo nuevo que incorpore variables medioambientales y de sostenibilidad en la edificación todavía no considerados.

Los tiempos actúales representan un momento emocionante en el que se plantea la posibilidad de virar el rumbo hacia una construcción armoniosa con el lugar en que se implanta. Una ciudad relacionada con la naturaleza, sin olvidar que además la prevención siempre reporta beneficio (económico, ecológico y social) a largo plazo.

Es hora de pasar de la eficiencia al decrecimiento. Es hora de buscar la mejora de los recursos y no su extinción. Es momento de minimizar la huella humana e incluso de mejorar el entorno en que se ubica. Es momento de dar un giro de 180º al modo de construir ciudad.

PROBLEMÁTICA

Escenario

La implantación de edificaciones y urbanizaciones suponen un impacto negativo en el territorio. La progresiva impermeabilización del terreno provoca profundas alteraciones hidrológicas y supone grandes inversiones en infraestructuras de canalización y depuración del agua recogida. La arquitectura tiene un papel protagonista en la consecución de un modelo de vida sostenible, y la gestión del agua es uno de los principales argumentos.

En España, el incremento de la temperatura media, la disminución de las precipitaciones, la modificación de los periodos estacionales, el deshielo de los glaciares pirenaicos, los episodios de tornados, la intensificación de la gota fría y el aumento de las sequías son episodios que confirman un cambio climático rápido y progresivo con consecuencias desconocidas.

Los modelos climáticos y previsiones realizadas no han resultado fiables frente a un fenómeno admitido y constatado pero impredecible. Además, la crisis económico/social actual incrementa la problemática. Con todo esto, la gestión y optimización de recursos se van a convertir, con toda seguridad, en un pilar fundamental para el bienestar del país. Para afrontar con mayor fortuna los desajustes del modelo actual será necesario potenciar la prevención.

Las infraestructuras dependientes de las condiciones climáticas, principalmente las relacionadas con el agua, van a quedar sobre o infradimensionadas, y las condiciones constructivas de los asentamientos humanos van a tener que modificarse. Se van a producir desigualdades intracomunitarias (tal como ya ocurre con Murcia, Almería o Barcelona) que desembocarán en difíciles conflictos.

CICLO URBANO DEL AGUA

El ciclo natural del agua consta de varias fases: evaporación, condensación, precipitación e infiltración. Todas ellas son de vital importancia para que el agua mantenga los niveles de vida estables y permita el desarrollo de un territorio sano.

Figura 6-02. Ciclo natural del agua. Foto: http://www.creciendo.andamiratu.com

Sin embargo, en la ciudad el ciclo del agua es bien distinto: Las precipitaciones atraviesan una nube de contaminación y llegan a un suelo prácticamente impermeable y arrastra toda la suciedad almacenada a través de unos canales estancos que la dirigen hasta unas depuradoras que intentan recuperar mediante procesos bacteriológicos un agua completamente degradada. Finalmente esta agua es vertida al río o mar para volver a empezar el ciclo, olvidando la infiltración al terreno y los beneficios derivados de la evaporación en el lugar.

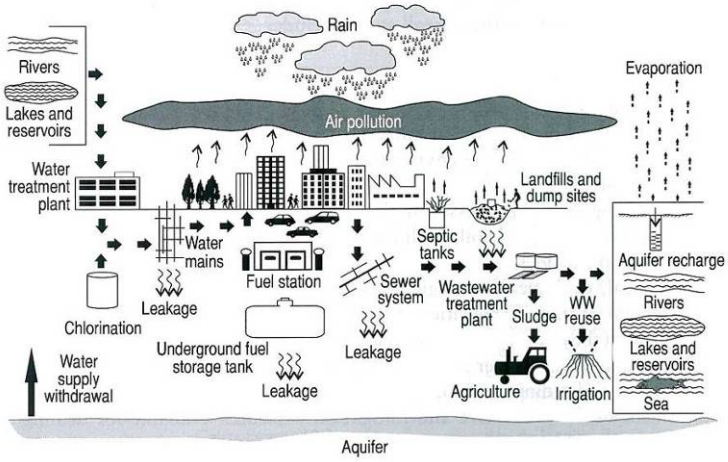


Figura 6-03. Ciclo Urbano del agua. Tomado de: Urban water cycle processes and interactions. Unesco publishing.

EFECTO ISLA DE CALOR

La impermeabilización de las superficies urbanas con materiales habitualmente bituminosos provoca un incremento de la temperatura de hasta 6 ºC. Son materiales oscuros, que absorben e irradian calor, y que además impiden la evaporación del agua.

El resultado es un ambiente urbano insano, calido en exceso y desnaturalizado. Un entorno contrario a las tendencias actuales del urbanismo bioclimático.

Con todo ello se dificulta de la disipación del calor durante las horas nocturnas. Comúnmente se da el fenómeno de elevación de la temperatura en zonas urbanas densamente construidas causado por una combinación de factores tales como la edificación, la falta de espacios verdes, los gases contaminantes y la generación de calor.

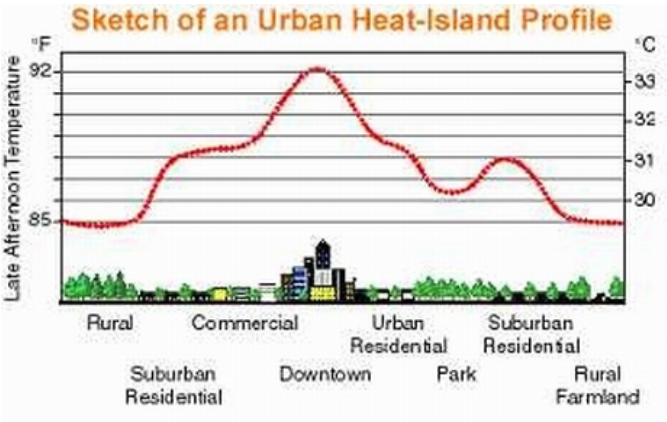
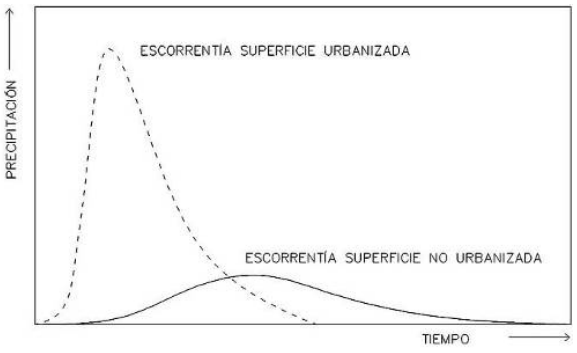


Figura 6-04. Isla de calor. Tomado de Wikipedia.

INCREMENTO ESCORRENTIA URBANA

Las superficies urbanas impermeables provocan una rápida concentración del agua precipitada en breves lapsos de tiempo, obteniéndose por resultado inundaciones y avenidas difícilmente absorbibles por las redes urbanas de saneamiento y alcantarillado, además de la alta carga contaminante que transportan como consecuencia del primer lavado de las calles después de periodos secos acumulativos.



Figuras 6-05 a) y b). Incremento de escorrentía urbana en periodos de precipitación intensa.

MARCO NORMATIVO ACTUAL

La normativa actual que recoge aspectos relacionados con la reutilización el agua se esquematiza en:

- Directiva 91/271/CEE . Tratamiento de aguas residuales urbanas
- Directiva Marco del Agua. 60/2000/CE
- Real Decreto legislativo 1/2001. Ley de Aguas
- Programa AGUA. Programa de actuaciones para la gestión del agua.
- Plan Nacional de Saneamiento y Depuración 1995-2005
- Plan Nacional de Calidad de las Aguas: Saneamiento y Depuración 2007-2015
- Reutilización de las Aguas depuradas: RD 1620/2007
- Normativa urbanística específica de cada municipio
- Código técnico de la edificación.

En ellas se especifica el modo y características de la depuración, reutilización y vertido de las aguas, pero no se aborda la cuestión de los sistemas de drenaje sostenible ni su implantación.

Existen no obstante excepciones como la de la Xunta de Galicia, que ya obliga a todas las viviendas nuevas que se construyan a instalar un sistema de recogida, almacenaje y depuración del agua de lluvia para su reutilización doméstica.

SUDS

Clasificación tradicional

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible son sistemas que recuperan el ciclo natural del agua en la ciudad.

La clasificación de estos sistemas mas aceptada es:

- A SISTEMAS DE CONTROL EN ORIGEN
  - Superficies permeables
  - Pozos y zanjas de infiltración
  - Depósitos de infiltración
  - Cubiertas vegetales
- B SISTEMAS DE TRANSPORTE PERMEABLE
  - Drenes filtrantes
  - Cunetas verdes
- C SISTEMAS DE TRATAMIENTO PASIVO
  - Franjas filtrantes
  - Depósitos de detención
  - Estanques de retención
  - Humedales artificiales

- D MEDIDAS PREVENTIVAS

Los Sistemas Los sistemas urbanos de drenaje sostenible deben entenderse además como componentes de una cadena de gestión y no como elementos aislados capaces de resolver el tratamiento del agua de modo individualizado.

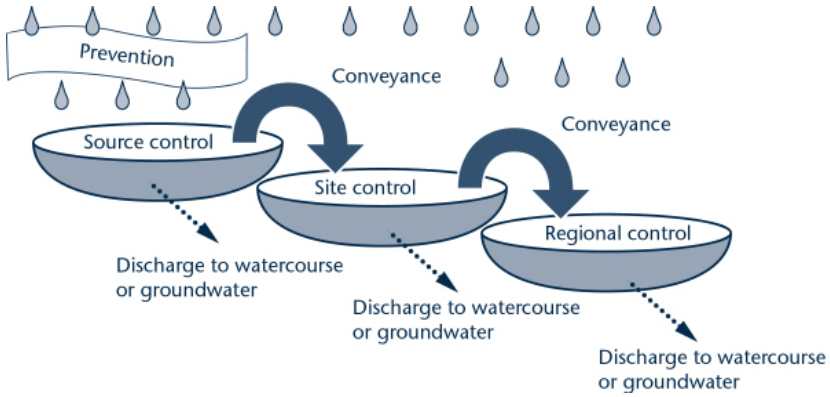


Figura 6-06. Cadena de Gestión. Fuente: CIRIA.

Ventajas de los SUDS frente a otros sistemas

Las ventajas de estos sistemas frente a sistemas más convencionales son:

- Mejoran la calidad del agua en corrientes urbanas.
- Restauran el flujo natural del agua.
- Protegen de inundaciones.
- Protegen de vertidos accidentales.
- Permiten desarrollo de zonas con instalaciones colmatadas.
- Ofrecen valores estéticos.
- Recargan acuíferos.
- Simplifican las instalaciones urbanas, abaratando el coste.

A- SISTEMAS DE CONTROL EN ORIGEN

Evitan la escorrentía superficial y recuperan la capacidad de infiltración original. Incluyen:

Superficies permeables: Superficies que permiten el paso directo del agua al terreno:

- Porosas: superficies granulares o de tierra vegetal reforzadas o confinadas, superficies de adoquines de hormigón poroso o pavimentos continuos de mezcla bituminosa porosa, hormigón poroso de cemento o de resina (son deseables puesto que mejoran la calidad del agua filtrándola y depurándola, pero tienen el problema de la colmatación, por lo que necesitan un mantenimiento adecuado).

- Permeables: elementos impermeables colocados en una disposición permeable: adoquines o pavimentos de hormigón con huecos o separaciones libres o rellenas de árido o tierra vegetal de manera que se logre una determinada permeabilidad.

Pozos y Zanjas de Infiltración: Perforaciones rellenas de material granular que recogen y almacenan el agua de escorrentía para su infiltración. Es necesario conocer las características del terreno y no se pueden realizar a menos de 5 metros de edificaciones por poder afectar a la cimentación.

Depósitos de Infiltración: Depresiones del terreno vegetadas diseñadas para almacenar e infiltrar gradualmente la escorrentía generada en superficies contiguas. Deben contar con un desagüe de emergencia conectado con la red general por si se supera la capacidad total. Permiten almacenar agua por encima de la superficie de infiltración en forma de lámina, con profundidades menores de 2,5 metros.

Cubiertas vegetales: Retienen el agua de lluvia, minimizan el caudal pico, mejoran el comportamiento térmico del interior de las construcciones, combaten el efecto "isla de calor" y recuperan para la ciudad espacios para la flora y fauna.

Figuras 6-07 a) y b). Diferentes tipos de cubiertas vegetales. Foto: b) Gernot Minke.

B- SISTEMAS DE TRANSPORTE PERMEABLE

Transportan lentamente el agua de escorrentía permitiendo la filtración, el almacenamiento, la infiltración e incluso la evaporación y oxigenación.

Drenes filtrantes: Zanjas recubiertas de material geotextil y rellenas de grava.
La grava permite una filtración de la escorrentía, atrapando materia orgánica, metales pesados y residuos grasos, los cuales son descompuestos por las bacterias al cabo del tiempo. La velocidad del agua es lenta por lo que existe infiltración a través del geotextil. Se pueden colocar dos tuberías porosas de unos 225 mm de diámetro. Una en la base del dren en toda su longitud o únicamente en su tramo final, para recoger el agua y desaguar. Y la otra a un nivel superior, marcado por el almacenamiento del volumen que suponen 10 mm de agua en la cuenca de contribución, que sirva de aliviadero en caso necesario.

La aplicación habitual es en carreteras, mejorando la seguridad vial y el mantenimiento.

Cunetas verdes: Canales vegetados con hierba, que conducen el agua de escorrentía desde las superficies de drenaje a un sistema de almacenaje o a una conexión con el alcantarillado existente. Son sistemas apropiados para la captación y conducción de escorrentía y suelen formar parte de la red de drenaje sostenible previo a humedales o estanques.

Tienen un ancho de hasta 3 metros y proporcionan un almacenamiento temporal de agua de lluvia. La pendiente transversal debe ser 1/4, y la longitudinal 1/50. La velocidad del agua será menor a 1 m/sg para evitar erosión y facilitar sedimentación. Se puede mejorar su funcionamiento interponiendo pequeñas presas de tierra.

La vegetación filtra la corriente, ayuda a la infiltración, a la evapotranspiración y permite que las partículas arrastradas se depositen. Se debe evitar aparcar vehículos, y la siega del césped debe realizarse al menos 2 veces al año.

C- SISTEMAS DE TRATAMIENTO PASIVO

Eliminar y descomponer los contaminantes del agua al final del proceso de tratamiento.

Franjas filtrantes: Sección de terreno vegetado con leve inclinación diseñado para recibir y filtrar la lámina de escorrentía atrapando sólidos y aceites. Pendientes inferiores a 1/20 y anchos de 5 a 15 metros.
Construcción: nivelar, extender y compactar 10 cm tierra vegetal, sembrar y proteger. La vegetación puede ser diversa: césped, arbustos, árboles. Varía el beneficio obtenido. Necesitan una labor de mantenimiento de siega y limpieza.

Depósitos superficiales de detención: Depresiones diseñadas para frenar durante unas horas la escorrentía de las tormentas y permitir la sedimentación de los sólidos en suspensión. La función principal es la eliminación de sólidos. Se puede incluir un desvío o by-pass de manera que, una vez recibida la escorrentía del primer lavado, la más contaminada, el resto pase al siguiente sistema de la cadena de drenaje. Cuentan con un desagüe en su parte inferior que puede llegar a colmatarse por la acumulación de sedimentos. La máxima profundidad de agua no debe exceder los 3 metros en ningún punto, siendo capaces los desagües de vaciar el depósito en 24 horas. Las pendientes laterales deben ser tendidas para permitir la salida en caso de caída al agua, y el acceso y mantenimiento cuando el depósito está vacío. Pueden ser utilizados como espacios públicos abiertos durante los periodos secos, aumentando la oferta de zonas verdes de la ciudad.

Depósitos enterrados de detención: Cuando no se dispone de terrenos en superficie o el entorno no permite una estructura a cielo abierto, estos depósitos constituyen el subsuelo. Los materiales con los que se construyen son hormigón y polipropileno.

Estanques de retención: Depresiones del terreno con volumen de agua permanente (50%). Su capacidad es 4 veces el volumen a tratar.(normalmente escorrentía de 5 ha). Profundidad: 3 metros máximo. Pendientes laterales tenidas para mantenimiento. Desagüe por encima de la línea permanente de agua. Para evitar la elevada concentración de nutrientes se debe asegurar un mínimo de corriente.

Humedales artificiales: Amplias superficies de agua poco profundas y con vegetación propia de pantanos o humedales naturales. Proporciona gran poder de filtración y eliminación de nutrientes gracias a la acción de las plantas. Se debe asegurar el flujo de agua anual, y las especies vegetales deben ser autóctonas. La dimensión debe ser al menos 3 veces el volumen a tratar, asegurando 2 semanas de retención. La profundidad oscila entre 0,6 m y 3m. Se deben colocar pozos de decantación para evitar dragados completos. NUNCA se puede aportar escorrentía urbana a humedales naturales.

Figura 6-08. Humedal artificial urbano en Adelaida (Australia del Sur).

D- MEDIDAS PREVENTIVAS

Encaminadas a conseguir buenas prácticas urbanas.

- Minimizar la escorrentía superficial en la ciudad.
- Drenar hacia zonas verdes en vez de derivar el agua al alcantarillado.
- Recoger aguas pluviales para uso posterior: riego, cisternas, lavadoras…
- Mantener la ciudad limpia de modo periódico.
- Concienciación de fuentes contaminantes: talleres, hospitales…
- Minimizar el uso de herbicidas y fungicidas en parques.
- Educación de los agentes implicados en el diseño y mantenimiento de la Ciudad.

NUEVOS SISTEMAS INCORPORADOS A MERCADO

Afortunadamente nuevos sistemas se están incorporando al mundo de la arquitectura y, amparados en la corriente ecológica actual. Destacan:

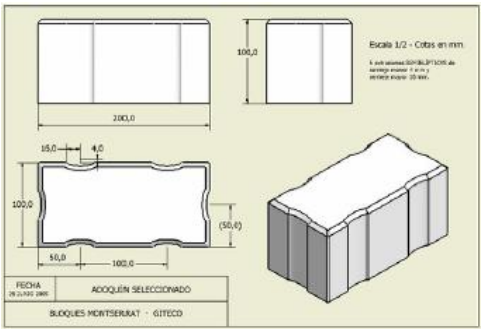
Figuras 6-09 a) y b). a) Pavimento poroso, placa Nidagravel; b) Sistema tipo Babylon. Fotos: a) http://www.nidagravel.be/UKEN/site/index.aspx; b) Jochen Scheerer. ASEPMA.

Láminas filtrantes purificadoras: Láminas geotextiles de diferentes espesores interpuestas en las zonas impermeabilizadas que retienen parte de los sólidos arrastrados por el agua de lluvia y conservan la humedad mas tiempo. Habitualmente se colocan en cubiertas vegetales.

Filtros de arena extensivos: Lechos de arena ubicados en zonas de nueva urbanización por los que se filtra el agua y se recoge depurada de sólidos.

Pavimentos porosos de grava confinada: Celdas retenedoras de árido con total permeabilidad y estabilidad frente al tránsito de peatones y vehículos. Sistemas tipo Nidagravel o similar.

Depuración de aguas grises en fachada. Sistemas tipo Babylon (De Asepma) diseñados para la reutilización y reciclaje de aguas grises o pluviales en fachadas vegetales. La Pared Vegetal Babylon® (Patent pending: **U 2008 01210**) permite la posibilidad de regeneración de aguas grises procedentes de ducha y lavabo a través del sistema de depuración de jardinería en vertical para diferentes usos como por ejemplo el riego de zonas verdes o el suministro a los váteres.



Figuras 6-10 a) y b). a) Adoquín con junta abierta preparada; b), Urinario seco. Fotos: http://www.urimat.es/

Pavimentos porosos depuradores. Pavimentos desarrollados para permitir el paso de agua pero reteniendo sólidos y materiales nocivos. Dentro de las consideraciones de su diseño destaca el estudio de tiempo de colmatación.

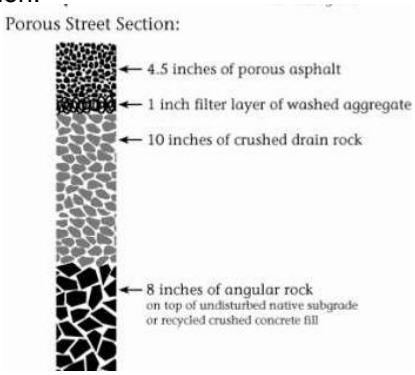
Sanitarios secos para interiores y exteriores. Modelos de aparatos sanitarios que no utilizan agua. Producen compost y su tratamiento se basa en lechos de humus además de limpieza bacteriológica por rayos UVA. Comercializados por empresas como *orixy*, *primateria* o *urimat*, entre otras.

Distintos sistemas de cubiertas vegetales. Las cubiertas vegetales son las que, sin duda, han tenido mayor repercusión en el mercado Español. Si bien la mayoría son traslaciones directas de los modelos importados desde el extranjero, por lo que no se adaptan a las condiciones climáticas de España. Existen no obstante importantes esfuerzos por conseguir modelos adecuados. Las diferencias estriban en:

Tipo de impermeabilización.

- Tipo de drenaje y almacenamiento de agua.
- Sustrato utilizado y espesor.
- Plantación aplicada.

Multitud de empresas como Atlantis, Remosa, Zinco, Soprema, Intemper y Geodrein están proliferando en el mercado de a construcción.

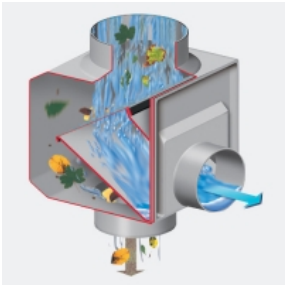


Figuras 6-11 a) y b). Asfalto poroso. Fotos: http://www.ecocreto.com/

Asfalto permeables, obtenidos como desarrollo para la mejora de la seguridad vial pero con beneficios derivados como son la infiltración del agua al terreno, el menor arrastre de partículas contaminantes y la reducción de la escorrentía en momentos de caudales pico.

Microturbinas hidráulicas. Primeras ideas para la utilización de la energía potencial del agua en su recorrido: bajantes, conducciones generales, etc.

Bajantes depuradoras. Filtros para el agua pluvial autolimpiables. Desarrollados para la eliminación de partículas mayores de 0,18mm. Mejoran el aprovechamiento del agua de lluvia hasta un 90%. (96% en sistemas industriales) y eliminan la contaminación del denominado *first flush* o primer lavado. El agua de rechazo es la encargada de la limpieza del sistema.



Figuras 6-12 a) a c). Filtro para bajante; b y c) Arquetas separadoras de grasas. Fotos: a) http://www.blipposol.com/; b y c) http://www.remosa.net/

Arquetas depuradoras. Arquetas prefabricadas separadoras de sólidos arrastrados y grasas. Permiten una depuración básica enfocada al almacenaje posterior en aljibes o depósitos.

Depósitos enterrados a pie de bajante. Nuevos modelos desarrollados que incluyen autodepuración hasta niveles aceptados para la reutilización en riego y cisternas de baño.

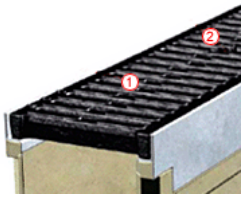
Depósitos de almacenamiento. Depósitos de almacenamiento de aguas grises y pluviales, con sistemas de tratamiento incorporados.

Figuras 6-13 a) y b). a) Depósito Carat (GRAF); b) Depósito Rondus (GRAF). Fotos: a y b) http://www.grafiberica.com/

Domótica del agua. Sistemas informáticos que gestionan el recurso del agua de modo racional facilitando el ahorro y el consumo responsable.

Drenajes lineales depuradores. Canaletas lineales que incluyen sistemas separadores de grasas. Permiten una mejora del agua enviada a las EDAR.

Lechos de juncos o Reedbed: Superficies de juncos ubicadas en una cadena de depuración que permite la reutilización posterior del agua tratada para riego.



Figuras 6-14 a) as c). a) Domótica. Control telemático; b) Canalón lineal; c) Depuración por lechos de juncos. Fotos: a) http://www.dexmatech.com/; b) http://www.aco.es; c) http://grupoterravita.com/es/.

RECLASIFICACIÓN

La clasificación tradicional anteriormente descrita responde a un compendio de las clasificaciones recogidas en distintas instituciones y países (principalmente anglosajones).

Sin embargo, no se deben olvidar otros aspectos igualmente importantes que afectan en la elección de los diversos sistemas. Se propone a continuación un esquema de organización atendiendo a los siguientes parámetros:

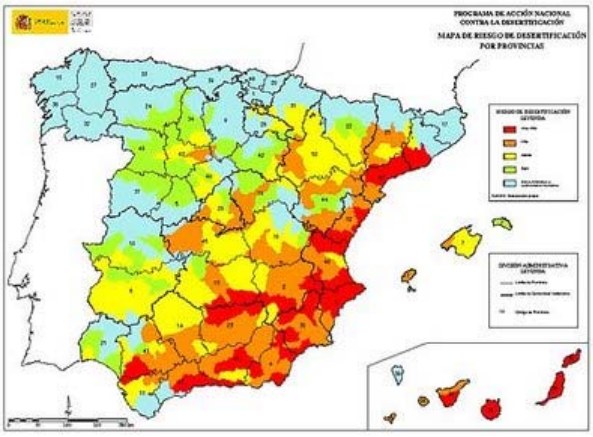
Figura 6-15. Re clasificación SUDS.

FUNCIÓN: Según sea la finalidad del sistema implantado: generación de energía mediante el transporte del agua, almacenaje de agua para uso posterior, descontaminación en origen, recarga de acuífero urbano, mejora ambiente urbano.

UBICACIÓN: Atendiendo a las grandes diferencias morfológicas de las zonas construidas, el sistema a incorporar será diferente: zonas urbanas consolidadas, zonas

industriales periféricas, zonas comerciales periféricas, grandes zonas deportivas, extensiones con infraestructuras de transporte y vías de comunicación.

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA: La localización geográfica del lugar de implantación es un gran condicionante para la elección del sistema más adecuado. Condiciones específicas de cada lugar: clima, topografía, terreno y características hidrológicas, entorno social, partida presupuestaria disponible,…



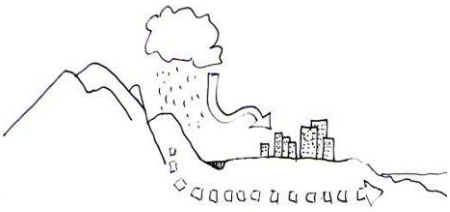


Figura 6-16 a) y b). a) Mapa de proceso de desertificación por provincias; b) Esquema del agua para la ciudad. Fotos: a) http//www.marm.es.

El recorrido del agua a lo largo de las zonas edificadas es extenso y de muy diversa índole. El análisis de los condicionantes descritos facilita la elección del sistema mas adecuado a cada lugar de actuación.

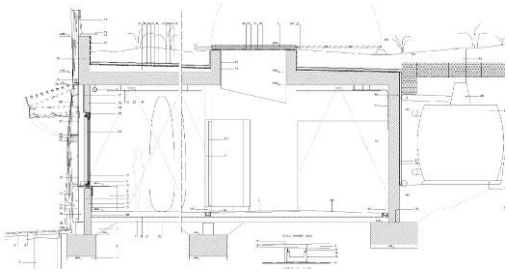
APLICACIÓN A PROYECTOS

Desde el inicio del estudio de los mencionados sistemas de drenaje, el departamento de arquitectura de Tragsatec ha comenzado a implantarlos en los distintos proyectos que desarrolla.

Doniños

Proyecto de Equipamientos municipales del puesto de Socorrismo y Salvamento e Instalaciones Municipales de Actividades Náuticas en la playa de Doniños, Concello de Ferrol, A Coruña. Pabellón en un entorno dunar protegido.

La actuación se orienta a la captación y reutilización del agua pluvial y gris, destinada al riego para la mejora vegetal del entorno, y evitando vertidos al lugar.



Figuras 6-17 a) y b). Cubierta vegetal y recuperación de agua de lluvia. Proyecto de Equipamientos municipales del puesto de Socorrismo y Salvamento e Instalaciones Municipales de Actividades Náuticas en la playa de Doniños.

Se incorpora además una zona cercana de infiltración de exceso de agua pluvial que recoge el agua que no pueda almacenar los depósitos dispuestos.

Parc Bit

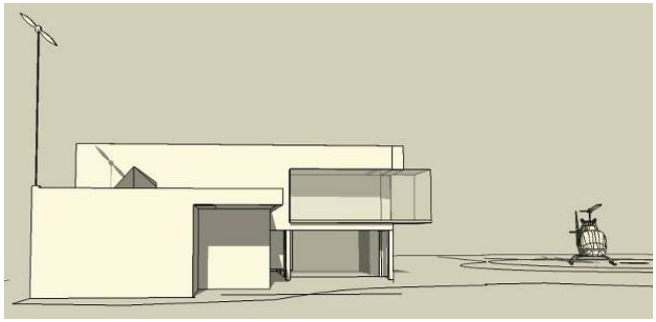
Proyecto de Complejo Balear de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación, ubicado en el parque tecnológico ParcBIT, Palma de Mallorca. Edificio de laboratorios y oficinas incluido dentro de un gran parque tecnológico con directrices bioclimáticas. Las cubiertas (vegetales) captan el agua de lluvia y esta se almacena en aljibes enterrados para su uso posterior de riego.

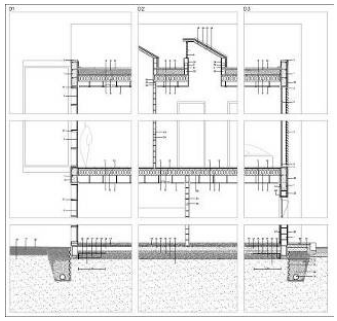
Figura 6-18. Cubiertas vegetales en edificio de investigación, ParcBit.

Guancha

Proyecto para Brigada contra incendio y aerotransportada y hangar para alojamiento de vehículos, en el helipuerto del término municipal de la Guancha, Tenerife.

La cubierta del edificio es vegetal con árido volcánico de la zona que permite el crecimiento de especies autóctonas y el almacenamiento del agua. El exceso se almacena en un aljibe enterrado.

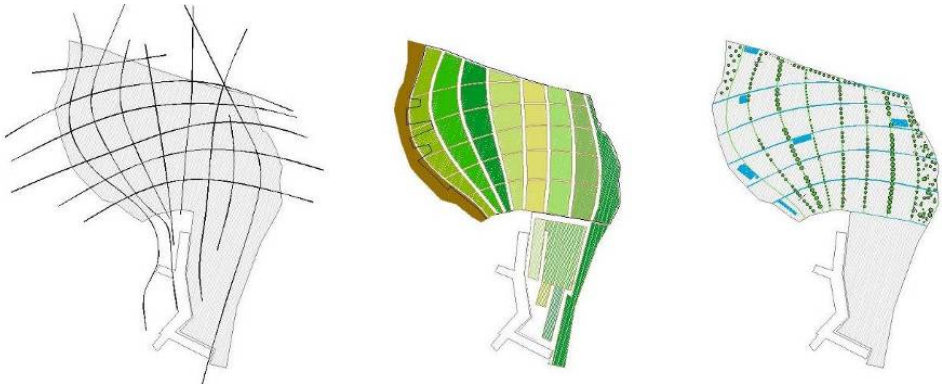




Figuras 6-19: Proyecto de cubierta vegetal en edificio para bomberos en La Guancha, Tenerife.

La Fombera

Proyecto de Campus dotacional en la parcela de La Fombera, perteneciente al Gobierno de la Rioja, Consejería de Medioambiente. La parcela se estructura en torno a las líneas de necesidad hídrica del vivero (uso principal) paralelas al río Iregua. Los edificios diseñados quedan enterrados bajo una cubierta vegetal que respeta el aspecto global de la parcela.



Figuras 6-20 a) a c). Aprovechamiento y recorridos del agua en Proyecto de Campus Dotacional en la parcela de La Fombera, La Rioja.

Aranjuez

Proyecto para la recuperación de la azuda de la montaña, rehabilitación del acueducto existente y adecuación de su entorno, en Aranjuez (Madrid).
Parque en el límite de la población de Aranjuez con graves problemas de erosión por escorrentía. La actuación contempla bermas de rotura de escorrentía como modelo de

ordenación paisajística y plantación de especies autóctonas con bajos requerimientos hídricos.

Figura 6-21: Bermas anti-erosión: Proyecto de recuperación de la azuda de la montaña, rehabilitación del acueducto y de su entorno en Aranjuez, Madrid.

GIAE: GESTION INTEGRAL DEL AGUA EN LA EDIFICACIÓN

La mejora de las condiciones del agua en la edificación no pasa exclusivamente por los sistemas urbanos de drenaje sostenible. El hombre influye en el ciclo natural del agua de dos formas: mediante la extracción y vertido del agua; o mediante la alteración de las características del suelo.

Como consecuencia de la urbanización extensiva, en las ciudades se pierde hasta un 90% del agua de lluvia.

Es necesario rediseñar el recorrido completo del agua por el entorno edificado. Para ello se propone un nuevo estudio enfocado a la gestión integral del agua en la edificación (GIAE).

La consecución de esta necesidad es producto del análisis del estado del arte en los SUDS, sistemas urbanos de drenaje sostenible.

Figuras 6-22 a) a c). Del campo a la ciudad: puntos para posibles mejoras del tratamiento del agua.

El enfoque del estudio propuesto abordará:

- Energía
- Depuración
- Ahorro
- Reciclaje
- Mejora ambiental-biotipo urbano

Para el desarrollo de un nuevo modelo se establecen los siguientes grupos de trabajo:

1 NORMATIVA	Estudio de la normativa española y europea aplicable, así como sus déficits y posibles mejoras.
2 ESTADÍSTICA	Toma / recopilación de datos y análisis de las conclusiones derivadas (p.e. Caudales, temperaturas, consumos, gastos derivados…)
3 TRATAMIENTO	Sistemas de tratamiento en recorrido y final, variantes existentes y proposición de mejoras y nuevos modelos.
4 CAPTACION	Análisis de sistemas existentes para el aprovechamiento de agua de lluvia, variantes y nuevas soluciones.
5 ENERGÍA	Inclusión de la energía (incluir ganancias o minimizar pérdidas optimizando recursos) en el ciclo urbano del agua.
6 ACTUALIZACION DE CONOCIMIENTO	Actualización del estado del arte en cuanto a los sistemas existentes o emergentes en el mercado.
7 INFORMACIÓN	Difusión del conocimiento y síntesis de los resultados.

Tabla 6-1. Grupos de trabajo en GIAE.

CONCLUSIONES

Los sistemas urbanos de drenaje sostenible suponen el punto de partida para el entendimiento de un nuevo modo de urbanizar. Es el punto de inflexión para comenzar a aplicar las medidas que permitan alcanzar el objetivo de cerrar el ciclo del agua urbano con beneficios sobre la calidad de la misma.

El estudio en profundidad de los sistemas existentes y sus clasificaciones ha permitido localizar las carencias de los mismos y proponer e incluir nuevos modelos.

Es necesario, sin embargo, profundizar en un nuevo modelo que permita entender el recorrido del agua por todo el entorno edificado, utilizarla de modo óptimo, no degradarla sino mejorar sus condiciones finales frente a las de partida, y sobre todo, una vez alcanzado dicho modelo, aplicarlo.

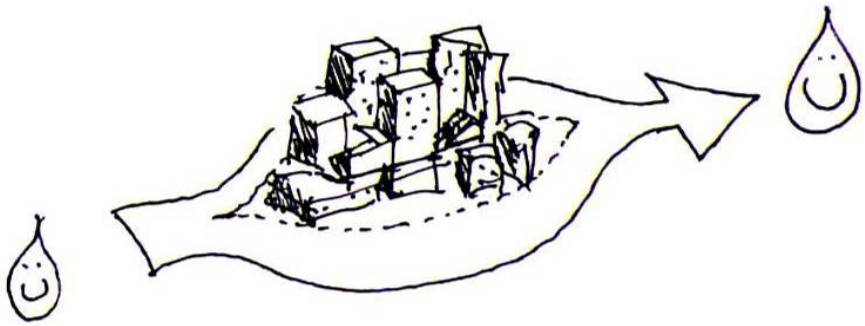


Figura 6-23. El agua no debería enterarse de su paso por las poblaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- CEDEX, Centro de estudios hidrográficos. (2008). “Gestión de las Aguas pluviales”.
- CEDEX, Centro de estudios hidrográficos. Ministerio de Fomento (2008). “Gestión de las aguas pluviales. Implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano”.
- Ecohabitar nº 22. “Informe agua”.
- Fundación Santander. “Manuales de Desarrollo sostenible. Hábitat humano y biodiversidad”.
- Gernot Minke (2000). “Techos verdes”. Ed. Geohabitar.
- Higueras, E. (2006). “Urbanismo bioclimático”.
- ITEC. (2007). “Parámetros de sostenibilidad”.
- National Geographic España. (Abril 2009). “Australia sedienta. Lluvias y cambio climático”.
- Neila González, F.J. (2004). “Arquitectura bioclimática. En un entorno sostenible”. Ed. Munilla-Lería.
- Palma Carazo, I. (2003). “Las Aguas residuales en la arquitectura sostenible”. Ed. Eunsa.
- PMEnginyeria – UPV. V Congreso Nacional de la Ingeniería Civil. (Sevilla 26, 27 y 28 de Noviembre de 2007). “Los sistemas urbanos de drenaje sostenible: una alternativa a la gestión del agua de lluvia”.
- Ruano, M. (1999). “Ecourbanismo. Entornos humanos sostenibles”.
- Smith, M.F. (2004). “Architecture in a climate of change. A guide to sustainable design”. Ed. Architectural Press.
- UNESCO Publishing. (2008). “Urban water cycle processes and interactions”. Urban water series.
- Werthmann, C. (2007). “Green Roof. A case study”.

CAPÍTULO 7. HIDROGEOLOGÍA Y AGROHIDROLOGÍA

ESTUDIO DE PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LA ZONA NO SATURADA EN LAS INMEDIACIONES DE DOS DISPOSITIVOS DE GESTIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS. PRESENTACIÓN DE LAS ESTACIONES DINA-MAR ZNS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS RECOPILADOS EN EL PRIMER CICLO DE FUNCIONAMIENTO. Por Enrique Fernández Escalante.

Este capítulo ha sido redactado en su totalidad por el coordinador del proyecto, Enrique Fernández Escalante, con el apoyo del Área de Arquitectura e Ingeniería de Tragsatec para la operatividad de las estaciones y de Miriam Senent para el tratamiento de los datos.

RESUMEN

En el marco del proyecto de I+D+i DINA-MAR, que investiga las zonas más susceptibles para la gestión de la recarga de acuíferos en España y criterios para el diseño de dispositivos idóneos, se han construido dos estaciones de toma de datos en las inmediaciones de un canal de recarga artificial. Este capítulo presenta los objetivos iniciales del proyecto, la metodología seguida, la descripción de las estaciones de toma de datos y una primera interpretación de los resultados tras dos ciclos de actividad que corresponden a los años hidrológicos 2007/08 (tramo final) y el ciclo completo 2008/09.

INTRODUCCIÓN

A partir de los datos de la ZNS registrados por varios sensores ubicados junto al canal de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste, integrados en lo que se ha llamado estaciones DINA-MAR ZNS, durante dos años de actividad, se lleva a cabo una interpretación sobre la evolución de los parámetros en la zona no saturada durante dos ciclos de recarga artificial. Esta ha servido para mejorar las técnicas de tratamiento de suelo y acuífero (SAT) aplicadas para incrementar la tasa de infiltración desde los canales, reducir la resistencia a la infiltración que provoca el aire entrampado en el acuífero sometido a sobrepresión (efecto *Lisse*), obtener parámetros hidrogeológicos veraces para mejorar la modelación, afinar la definición de la morfología del bulbo de humidificación, etc. En este capítulo se presentan los datos obtenidos y la interpretación tras dos años de operatividad, si bien el proceso de captura de datos e interpretación de resultados continúa en la actualidad.

La premisa de partida se ha basado en que para aumentar la efectividad de los dispositivos de gestión de la recarga (antes recarga artificial y en adelante AR o MA) es preciso elevar la tasa de infiltración y conocer en mayor profundidad los procesos que

influyen en ella, especialmente en el tránsito desde el dispositivo a la zona saturada del acuífero. Para ello, hay que estudiar los parámetros de la zona no saturada (en adelante ZNS), tales como la tensión generada por el aire que se entrampa durante el proceso de AR, la morfología del bulbo de humidificación y las permeabilidades horizontal y vertical.

La información sobre los parámetros de la zona no saturada es obtenida a partir de los sensores colocados en dos estaciones elaboradas en el marco de este proyecto y denominadas DINA-MAR ZNS 1 y 2. Ambas se encuentran a escasos metros del canal de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste, dispositivo construido para incrementar los recursos hídricos subterráneos, y utilizarlos para regadío. La obra fue propuesta por el Ministerio de Agricultura y la Junta de Castilla y León (JCL), y ya cuenta con ocho años de operatividad, con volúmenes infiltrados entre 0,5 (año hidrológico 2007/08) hasta 12 hm^3 (en el A.H. 2006/07).

En este capítulo se presentan los datos y analizan los resultados preliminares de los dos primeros ciclos de operatividad, abriendo la puerta a una interesante línea de investigación que todavía nos ocupa.

ENCUADRE

En líneas muy generales la Cubeta de Santiuste cuenta con una superficie aproximada de 42 km^2, se encuentra al oeste de la provincia de Segovia y sureste de la provincia de Valladolid. Está comprendida entre los términos municipales de Llano de Olmedo, Villeguillo, Coca y Santiuste de San Juan Bautista, en la margen izquierda de los ríos Voltoya y Eresma,

El acuífero se caracteriza por poseer una formación arenosa cuaternaria, de hasta 55 metros de espesor (Unidad Arévalo), que rellena una cavidad compleja de un sustrato Terciario arcilloso (Facies Cuestas) o areno-arcilloso (Facies Puente Runel). Esta unidad da origen a la superficie morfológica de Coca-Arévalo, constituida por depósitos arenosos de origen fluvial, parcialmente recubierta por depósitos eólicos y áreas endorréicas, con varios sistemas lagunares ya fosilizados, lo que lleva a cuestionar el término de “cubeta” ante la elevada poligenia del sistema. La descripción detallada de las facies de los acuíferos y su funcionamiento hidrogeológico se describe con detalle en MAPA, 2005 y Fdez. Escalante, 2005.

El dispositivo está compuesto por canales, balsas y pozos, que se encargan de infiltrar los excedentes invernales derivados del río Voltoya, para luego usarse en el periodo estival. Comienza a partir de un pequeño embalse en el río Voltoya. Desde aquí sale una tubería enterrada de 10 km. de longitud pendiente abajo, que termina en un depósito (cabecera del dispositivo) de 36 m^3 en cuya entrada hay instalado un caudalímetro. A continuación, aparece una balsa de decantación de 14.322 m^2 de superficie, de la que parten los dos canales principales. El originario o “Caz Viejo”, comenzó a funcionar en 2002 por el este de la Cubeta; y el “Caz Nuevo”, operativo desde 2005, discurre semiparalelo al anterior y a su izquierda. (“caz” es la terminología regional empleada para este tipo de canales).

El “Caz Viejo” tiene un trazado que coincide en un 20 % con el cauce del antiguo arroyo de la Ermita. La traza del canal salva 30 m de desnivel, con una pendiente media de 0,28% a través de 10.667 m. El canal tiene 54 dispositivos de parada para incrementar la infiltración a través de una superficie que ronda los 33.300 m^2, considerando la infiltración por el fondo y por las paredes.

El Nuevo Caz tiene una longitud total de 17.293 m. Está ubicado en el sector de máximos espesores del acuífero, por lo que su superficie de infiltración efectiva es prácticamente total. Se ha construido en dos etapas: La primera, hasta la confluencia con el caz Viejo, al sur de Villeguillo, que comenzó su operatividad en el ciclo de recarga artificial 2006/07, sobrepasando el doble del volumen de agua infiltrado en el acuífero en el ciclo precedente. La segunda etapa prolonga el Caz Viejo, atravesando Villeguillo por un sistema de drenaje antiguo, y va a salir en las inmediaciones del cementerio, discurriendo hacia el norte, hasta Llano de Olmedo. Este trazado estuvo en desuso en los ciclos 2005/06 y 2006/07, cuando la recarga artificial cesó en las inmediaciones de Villeguillo. En este bienio se han hecho obras de mejora. La superficie de infiltración, que era de aproximadamente 23.850 m^2, fue ampliada a 27.960 m^2, tras las obras de ampliación hacia el norte en Llano de Olmedo, llevadas a cabo por la JCL en 2007.

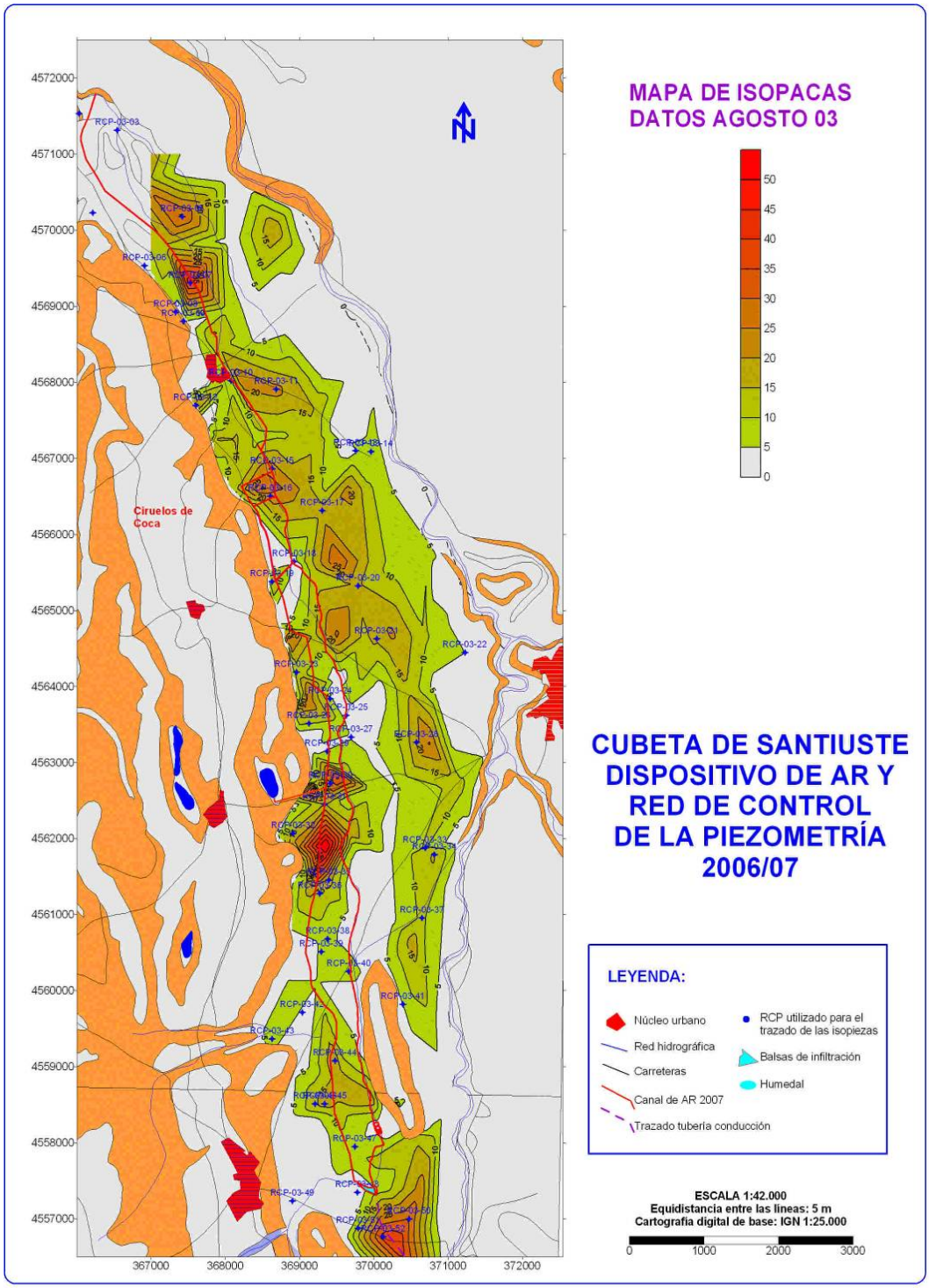
El caudal procedente del río Voltoya ronda los 0,5 m^3/s, con un periodo de concesión que se extiende desde el primero de noviembre al último día de abril, si bien esta concesión depende del carácter del año hidrológico.

La descripción detallada de la Cubeta de Santiuste, del acuífero en que se ubica y del dispositivo aparece descrita con detalla en otros capítulos de esta publicación tales como 2 y 8, por lo que se remite a los mismos para ampliar información con objeto de evitar redundancias.

En la figura 7-01 se muestra el dispositivo sobre la cartografía de isopacas del acuífero arenoso cuaternario. En él se pueden diferenciar los canales, balsas, etc.

En las inmediaciones del canal nuevo se han construido las estaciones DINA-MAR ZNS 1 y 2, La primera dista 38 m del canal en sentido opuesto a las líneas de flujo de las aguas subterráneas en condiciones de “aguas bajas” y la segunda 12 m en el sentido del gradiente hidráulico descendente, que son descritas en apartados posteriores.

Figura 7-01. Trazado del dispositivo de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste (página siguiente)


MAPA DE ISOPACAS
DATOS AGOSTO 03
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
Ciruelos de Coca
CUBETA DE SANTIUSTE
DISPOSITIVO DE AR Y
RED DE CONTROL
DE LA PIEZOMETRÍA
2006/07
LEYENDA:
Núcleo urbano
Red hidrográfica
Carreteras
Canal de AR 2007
Trazado tubería conducción
RCP utilizado para el trazado de las isopiezas
Balsas de infiltración
Humedal
ESCALA 1:42.000
Equidistancia entre las líneas: 5 m
Cartografía digital de base: IGN 1:25.000
0
1000
2000
3000
4572000
4571000
4570000
4569000
4568000
4567000
4566000
4565000
4564000
4563000
4562000
4561000
4560000
4559000
4558000
4557000
367000
368000
369000
370000
371000
372000

Figuras 7-02 a) y b). Cabecera del dispositivo de AR y balsa de decantación de la que parten ambos canales.

OBJETIVOS

Cada estación DINA-MAR ZNS recoge cinco datos en continuo, con mediciones cada 15 minutos. En esta etapa se pretende llevar a cabo una aproximación para el estudio de tendencias con medias diarias, postergando para etapas posteriores los estudios sobre la evolución de parámetros a escala horaria o inferior.

Con los 10 tipos de datos registrados por los sensores, se ha iniciado un largo proceso para, por un lado, conocer la morfología y cuantificar el avance del bulbo de humidificación, y por otro, dar respuesta a los siguientes objetivos:

- Conocer mejor la asimetría del bulbo de humidificación desde los canales de recarga artificial hacia los lados.
- Tener criterios para la disociación de la recarga natural y artificial, de cara a minimizar el error de cierre del balance hídrico, hasta ahora estimado con el modelo HELP (en MAPA, 2005).
- Conocer cómo influye la expansión del bulbo de humidificación en los parámetros de la ZNS, especialmente en la tensión capilar, variaciones en la capacidad de succión y en la humedad a distintas profundidades, factores determinantes para el diseño de las técnicas de Tratamiento de Suelo y Acuífero (SATs) que se pretenden adoptar.
- Cuantificación de la tasa de avance (H y V) del agua de la recarga artificial a lo largo de cada ciclo de recarga artificial (en adelante AR).
- Estimación del aire entrampado en el acuífero (efecto Lisse) o sobrepresión en el acuífero por el aire entrampado en sus poros y su migración.

En etapas posteriores se pretende además estudiar la validez de las ecuaciones de Kraihenhoff y Ernst en la zona y para el tipo de acuífero objeto de estudio (detrítico de grano fino y alta permeabilidad), así como estudiar la influencia de la capilaridad en el flujo darciniano (tensión superficial, densidad del agua, viscosidad del fluido, gravedad,

humedad, estructura del suelo, profundidad del nivel freático, Temperatura del suelo, cubierta de vegetación, tipos de cultivo, pendiente, etc.).

Las estaciones permitirán, además, comprobar la efectividad de las obras construidas por el Grupo Tragsa para el Ministerio de Agricultura (actual MARM) y la Junta de Castilla y León.

Conviene mencionar que algunos de estos objetivos requieren una secuencia de datos plurianual, por tanto, no pueden ser interpretados con plenitud en esta fase del estudio, quedando postergados para etapas posteriores del proyecto de I+D+i.

MATERIALES Y MÉTODOS

A comienzos de 2008 comenzó la instalación de las dos estaciones "DINA-MAR ZNS 1 y 2, para el estudio y control de la evolución de la humedad y de la tensión en la zona no saturada del subsuelo".

Tras estudiar y seleccionar la instrumentación más adecuada para los fines pretendidos, cada estación consta de tres sensores: Dos humidímetros SDEC, que además del porcentaje de humedad miden la temperatura, el superior ubicado en torno a 0,5 m de profundidad (con objeto de que uno quede saturado al durante el ciclo de recarga artificial) y el inferior a 2 m en la estación ZNS-1 y 1,1 en la ZNS-2 (en la que el nivel del agua es más somero). Además cada una cuenta con un tensiómetro Bourdon (figura 7-04) ubicado entre los dos humidímetros-termómetros, y su membrana se encuentra en torno a 1,05 m, poco por encima del nivel de aguas altas que se consigue al final de cada ciclo de recarga artificial. Su principal misión es aproximarse a una medición del aire entrampado en los poros y la compresión que ejerce sobre los poros de la ZNS. Los sensores están dispuestos de modo transversal al canal, uno gradiente hidráulico arriba y otro abajo, con objeto de detectar y cuantificar el avance del bulbo de humidificación y poder conocer mejor su morfología y simetría.

De este modo quedan registrados en continuo cinco parámetros en cada una de las dos estaciones: Dos medidas de humedad, dos de temperatura y una de tensión capilar. La medición se efectúa cada 15 minutos, y las señales quedan recogidas en un data-logger. Así mismo se ha instalado el instrumental preciso para el televolcado de la información. La disposición de los sensores se presenta a continuación (Figura 3). Además de las mediciones automatizadas se han realizado otras *in situ* mediante microterminal tipo *Microterm 4800* (figura 7-04).

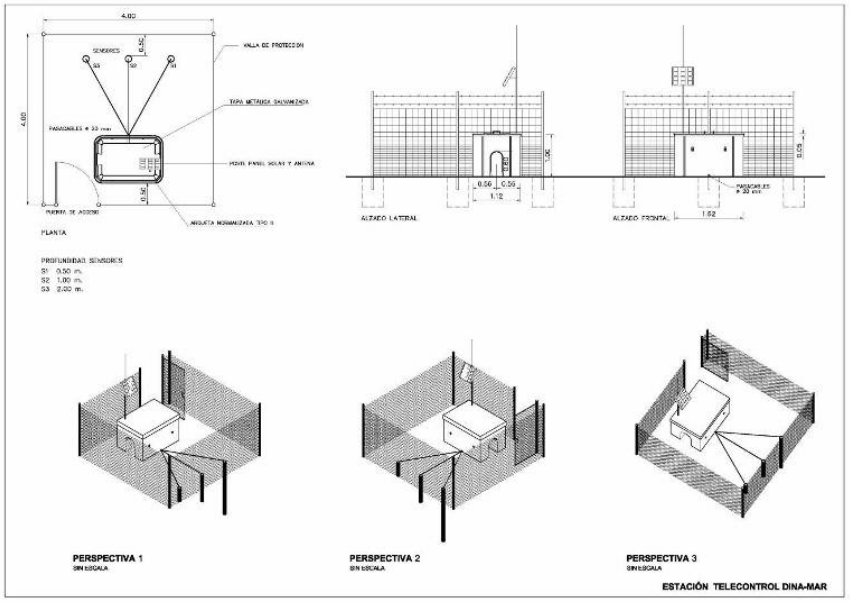


Figura 7-03. Configuración de las estaciones DINA-MAR ZNS y sensores instalados (tomado del proyecto de obra, Tragsatec, 2007/8).

Figuras 7-04 a) y b)- Instrumentación instalada en las estaciones DINA-MAR ZNS (tensiómetros y humidímetros) y aspecto del Microterm.

El estudio de la variación del nivel del agua en las inmediaciones de las estaciones se ha realizado por la medición de dos pozos adyacentes a ambas y su inclusión en una cartografía hidrogeológica y un modelo de flujo (Modflow).

La disociación entre el agua infiltrada procedente de la lluvia y de la recarga artificial se lleva a cabo, hasta la fecha midiendo la humedad en la ZNS mediante humidímetro Eijkelkamp y mediante el modelo HELP *(Hidrological Evaluation Landfill Performance),* elaborando balances hídricos parciales dentro del sistema. La corrección del modelo mediante datos tomados en la ZNS requiere series de datos, al menos, anuales.

El aspecto de ambas estaciones se presenta en las figuras 7-05 y 7-06 y su ubicación exacta en la tabla 7-01.

Estación	Coordenadas	Parcela Sigpac
DINA-MAR ZNS-1	X: 369694 / Y: 4557512	40:221:0:0:1:6244
DINA-MAR ZNS-2	X: 369246 / Y: 4561559	40:65: 265:0:7:5376:2

Tabla 7-01. Ubicación de las estaciones DINA-MAR ZNS-1 Y DINA-MAR ZNS-2 en Segovia.

Figuras 7-05 a) y b). Aspecto de la estación DINA-MAR ZNS 1 en Santiuste de San Juan Bautista (Segovia) y DINA-MAR ZNS 2 en Villagonzalo de Coca (Segovia).

DATOS

Las estaciones DINA-MAR ZNS han comenzado a estar operativas en junio de 2008, coincidiendo con el corto ciclo de recarga artificial que ha habido en el año hidrológico 2007/08 de ocho días al final de mayo de 2008, mes con intensas precipitaciones. En este periodo fue derivado un caudal del río Voltoya hasta los canales y balsas de infiltración de 516.000 m^3.

Tras una etapa de calibración, la toma de datos automatizada se hizo coincidir con el nuevo ciclo de recarga artificial del año hidrológico 2008-2009, que comenzó el primero de octubre de 2008 y terminó el 30 de abril de 2009.

Datos termo-pluvio tomados en la Estación meteorológica SG-02 durante el ciclo de recarga artificial

El siguiente pluviograma y termograma (figuras 7-06 y 7-07) se han realizado con los datos de la estación meteorológica SG-02, de Nava de la Asunción, distante en torno a 5 km de las estaciones. Esta estación es completa. Los datos disponibles corresponden a la duración del ciclo de recarga (de 1 de octubre de 2008 a 30 de abril de 2009).

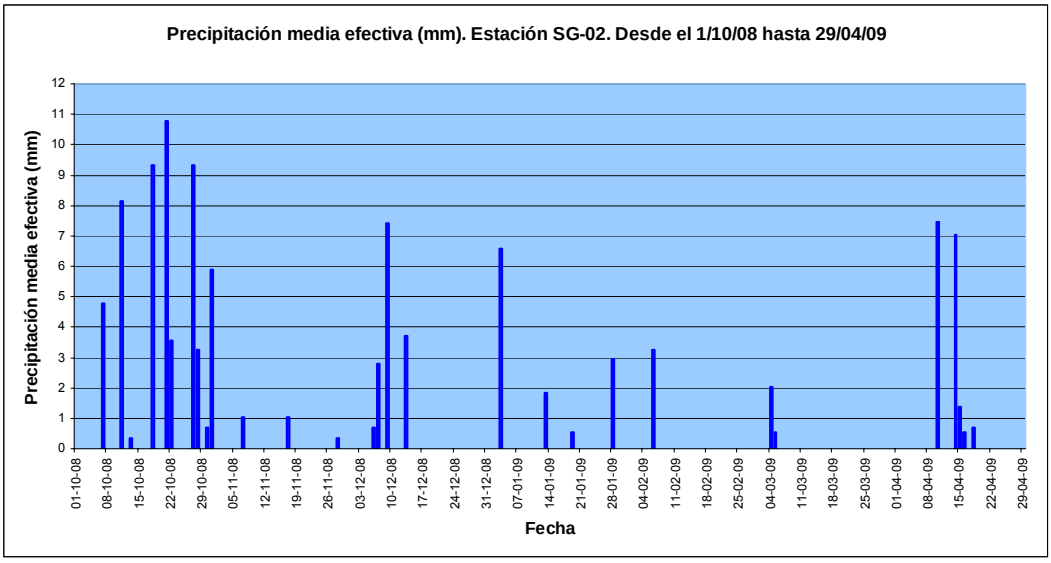


Figura 7-06. Pluviograma de la estación meteo SG-02, Nava de la Asunción, para la duración del ciclo de gestión de la recarga.

El 7º ciclo de recarga artificial comenzó el 1 de octubre de 2008 y terminó el 30 de abril. Durante el primer mes el caudal de entrada en la cabecera del dispositivo tipo canal rondaba los 750 l/s, durante el segundo mes bajó en torno a 500 y desde entonces el caudal entrante oscilaba en torno a 180 l/s. El volumen total recargado en este período fue de 8,0 hm^3.

Las circunstancias climáticas en la estación más cercana presentó oscilaciones importantes, con fuertes precipitaciones al primer mes, en la primera quincena de diciembre (nieve), en la primera y última semana de enero y en la segunda de abril. Los valores máximos registrados fueron 21, 27 y 18 de octubre con 10,76; 9,34 y 9,32 mm respectivamente. Las temperaturas mínimas fueron la primera quincena de enero.

Datos registrados en la Estación ZNS-1 (Santiuste) durante el ciclo de recarga artificial

En este período se han registrado en continuo los datos descritos en el apartado precedente, con una carencia accidental debida a una avería en el equipo entre los días 2 de octubre y 18 de noviembre y entre el 18 de febrero y uno de mayo en la estación ZNS-1. En estas fechas la toma de datos fue ocasional y manual mediante Microterm. Con las medidas tomadas se han realizado las gráficas siguientes de apoyo a la interpretación (figuras 7-06 a 7-11).

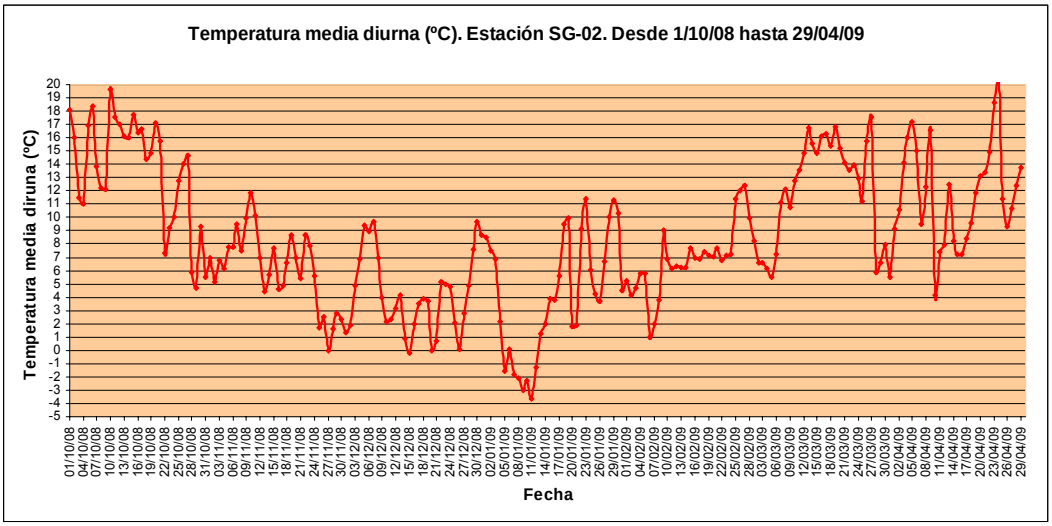


Figura 7-07. Termograma de la estación meteo SG-02, Nava de la Asunción, para la duración del 7º ciclo de gestión de la recarga en la Cubeta de Santiuste.

ZNS-1. Humidímetro 0,5 m. Desde el inicio de la toma de datos hasta la primera quincena de diciembre la humedad presenta una tendencia ligeramente ascendente, hasta el 12 de diciembre, que presenta un valor de 30,2 %, a partir del cual la tendencia se torna descendente hasta el 28 de diciembre (valor mínimo de 23,44 el 25 de diciembre). A partir de este valor la tendencia es fuertemente ascendente, alcanzando valores de 29,05 % en cuatro días. Desde entonces la tendencia presenta escasas oscilaciones de en torno al 2%.

La temperatura presenta fuertes altibajos en periodos aproximadamente semanales. Los mínimos valores se correlacionan con el descenso de humedad de la segunda quincena de diciembre. Se registra un nuevo valle que coincide con un descenso de humedad de en torno al 2% entre el 5 y 15 de enero.

ZNS-1. Humidímetro 2,0 m. El humidímetro instalado a 2 m presenta valores ligeramente ascendentes entre el 30 y 40% desde el inicio del ciclo hasta el 7 de diciembre, cuando se produce un brusco ascenso, alcanzando valores cercanos al 90% durante seis días. Del 20 al 24 de diciembre hay un descenso de 53 a 24 % aproximadamente, el 25 de diciembre aumenta hasta 49,13 % y el 26 de diciembre se registran valores negativos, que se interpretan como que el humidímetro ha entrado en saturación. Por tanto, el bulbo de humidificación ha necesitado 85 días para alcanzar desde el nivel del agua en el canal (situado unos 40 cm sobre la profundidad del sensor) hasta una distancia de 38 metros, lo que representa un gradiente hidráulico cercano al 1%.

El registro térmico es claramente descendente, con valores de 12,6 a 10,14 ºC en 35 días, con un ligero cambio de tendencia entre el 10 y 12 de diciembre, que se correlaciona con un fuerte aumento en la humedad. Entre el 24 y 25 de diciembre la temperatura disminuye en torno a 5 grados. El 26 e diciembre comienzan los valores

negativos, que se interpretan como que el sensor está saturado. Estos datos coinciden claramente con el registro de la humedad.

ZNS-1. Tensiómetro 1,0 m. La tensión capilar presenta tendencias claramente proporcionales. Guarda clara proporcionalidad con la tendencia creciente de la segunda semana de diciembre. Durante la tercera semana las fuertes variaciones de humedad coinciden de manera inversamente proporcional con las de tensión. Cuando el sensor ubicado a 2 metros entra en saturación, el tensiómetro ubicado a uno registra una tendencia ascendente en la última semana de diciembre (de 10,99 a 13,03). Desde entonces existe una cuestionable correlación con la humedad registrada a 0,5 m, si bien se registran varios picos entre el 20 y 30 de enero. Valor máximo de 14,56 el 28 de enero. La correlación con la temperatura parece, a grandes rasgos, inversa.

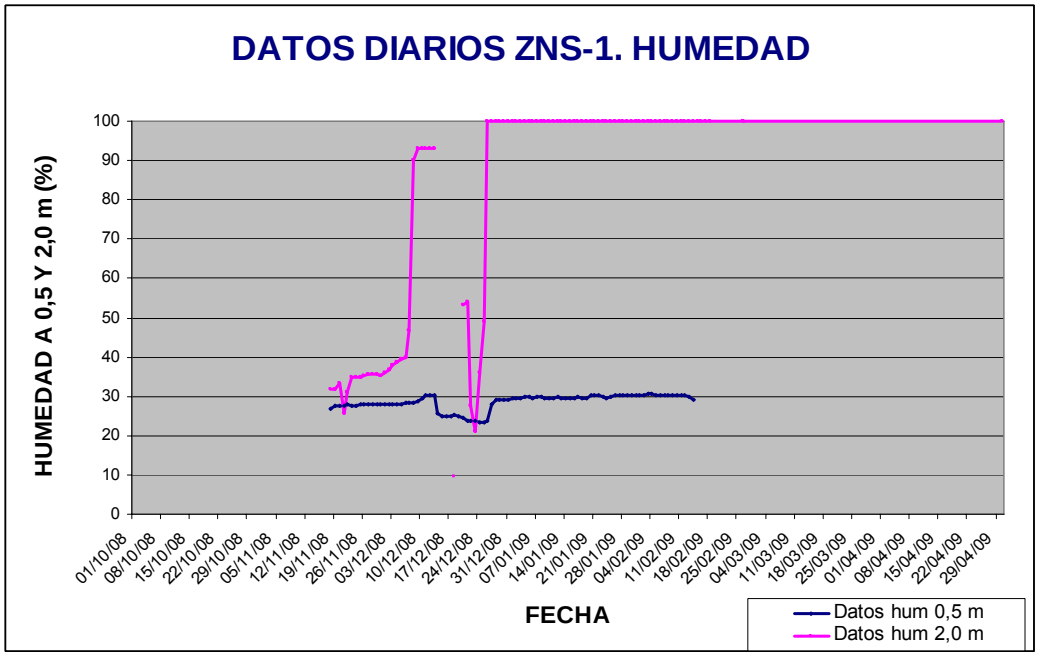


Figura 7-08. Gráfica de humedad registrada en la estación DINA-MAR ZNS 1 de Santiuste para la duración del 7º ciclo de recarga artificial en la Cubeta de Santiuste. Profundidad de los sensores: 0,5 y 2,0 m.

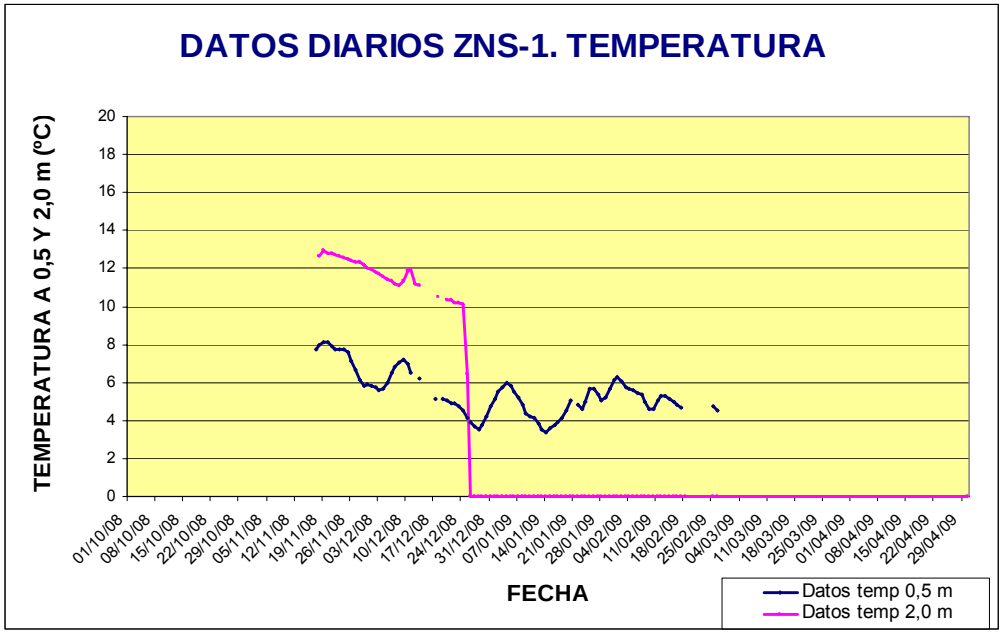


Figura 7-09. Gráfica de temperatura registrada en la estación DINA-MAR ZNS 1 de Santiuste para la duración del 7º ciclo de recarga artificial en la Cubeta de Santiuste. Profundidad de los sensores: 0,5 y 2,0 m.

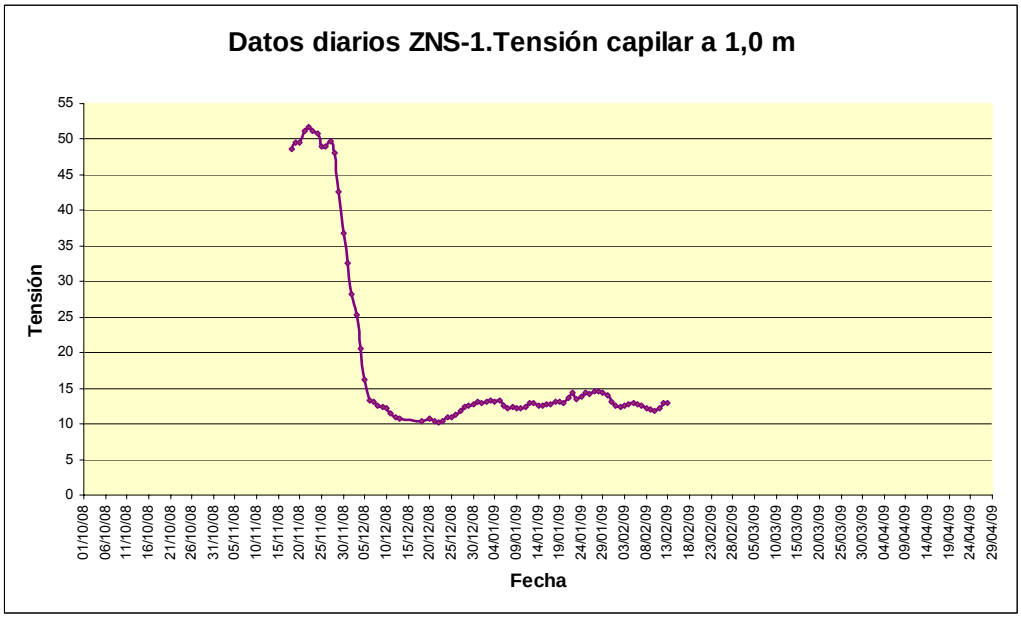


Figura 7-10. Gráfica de tensión capilar registrada en la estación DINA-MAR ZNS 1. Profundidad del sensor 1,0 m.

Datos registrados en la Estación ZNS-2 (Coca) durante el ciclo de recarga artificial

ZNS-2. Humidímetro 1,1 m. El humidímetro instalado a 1,1 m presenta valores ligeramente ascendentes entre el 42 y 45% desde el inicio del ciclo hasta el 8 de diciembre, cuando se produce un brusco ascenso, al igual que ocurrió en ZNS-1, alcanzando el 55% el 26 de diciembre. La tendencia se mantiene estable hasta la segunda semana de enero (52,32% el 12 de enero). La gráfica presenta un nuevo pico, bastante suave, del 13 al 31 de enero, con un valor máximo de 59,13 el 19 de enero. Otro pico más suave aparece entre esta fecha y el 9 de marzo, coincidiendo con un valle en la temperatura. Un nuevo valle se produce entre el 4 y el 16 de abril con registro inverso en el termograma, que presenta un pico más acusado dentro de su tendencia ascendente general.

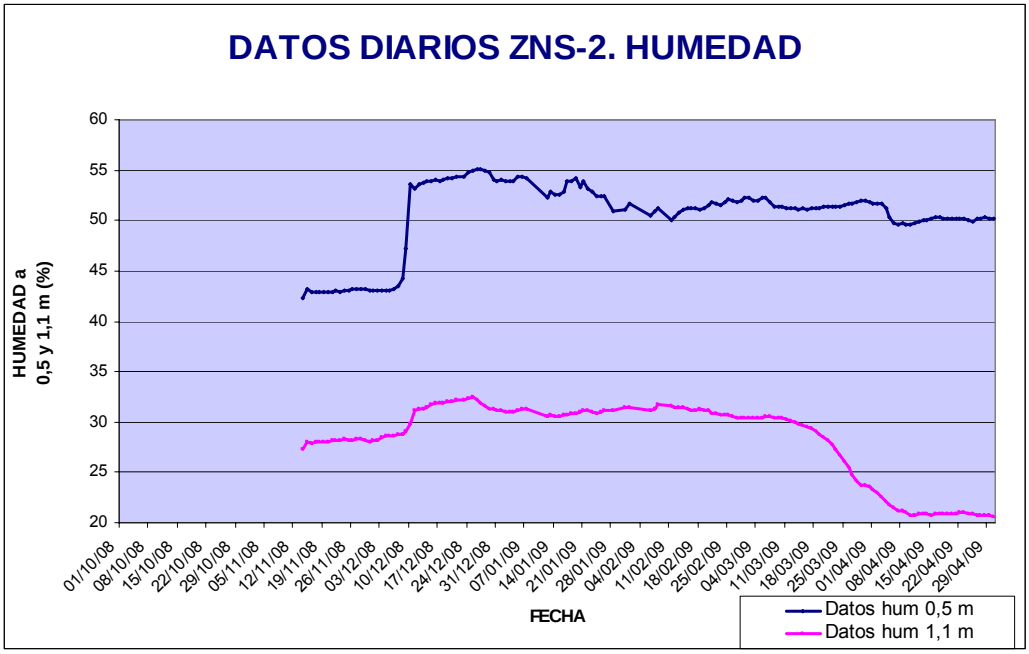
ZNS-2. Humidímetro 0,5 m. Este registro presenta tendencia ascendente hasta el 9 de diciembre (29 %). Desde ahí se registra un pico hasta el 3 de enero, con un valor máximo el 25 de diciembre de 32,44%). Hasta la segunda quincena de febrero hay claros altibajos (con un valor mínimo de 30,51% el 12 de enero). Del 15 de febrero al 13 de marzo la tendencia es ligeramente descendente, aumentando la pendiente entre esta fecha (29,81%) y el 10 de abril (20,8 %). Hasta el final del ciclo la gráfica presenta tendencia estable.

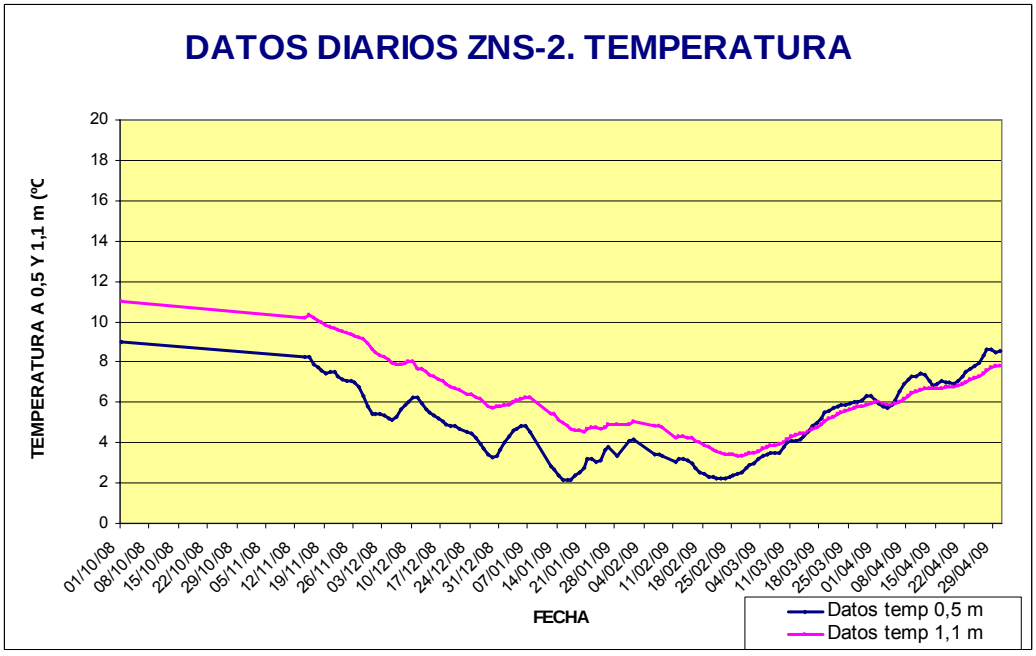
El registro térmico es claramente inversamente proporcional, aunque las pendientes son claramente menos acusadas y las oscilaciones son suaves.

ZNS-2. Tensiómetro 1,05 m. La tensión capilar del tensiómetro ubicado a un metro presenta tendencias que guardan cierta proporcionalidad con ambos humidímetros, si bien esta relación no resulta tan nítida como en la estación anterior.

El sensor ubicado a 1,1 metros no ha entrado en saturación, según se desprende de la toma de niveles de piezometría en un pozo cercano, si bien a partir de mediados de diciembre el bulbo de humidificación parece rozar el sensor y el canal parece haber entrado en control lateral (hay una distancia de unos 10 metros entre el canal y el sensor más profundo y 12 m al más somero). El nivel del agua en el pozo ha oscilado en torno a 1,15 m respecto al nivel del terreno y el gradiente hidráulico resultante es del 6%. Desde entonces la tensión tiende a aumentar, con ciertos altibajos, a medida que lo hace el nivel freático.

Los valores mínimos, registrados en torno al 15 de abril, presentan una relación de proporcionalidad en contraposición directa, lo que parece estar supeditado a la ausencia de precipitaciones en este periodo.





Figuras 7-11 a) y b). Gráficas de humedad y temperatura registradas en la estación DINA-MAR ZNS 2 de Coca para la duración del 7º ciclo de recarga artificial en la Cubeta de Santiuste. Profundidad de los sensores: 0,5 y 1,1 m.

RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

A tenor de las gráficas presentadas, y en líneas generales, se aprecia una inmediata reacción de los humidímetros ante las precipitaciones. Los más someros (0,5 m) presentan una respuesta muy rápida con gráficas abruptas. Los más profundos presentan retardos de hasta un día y las gráficas son mucho más suaves.

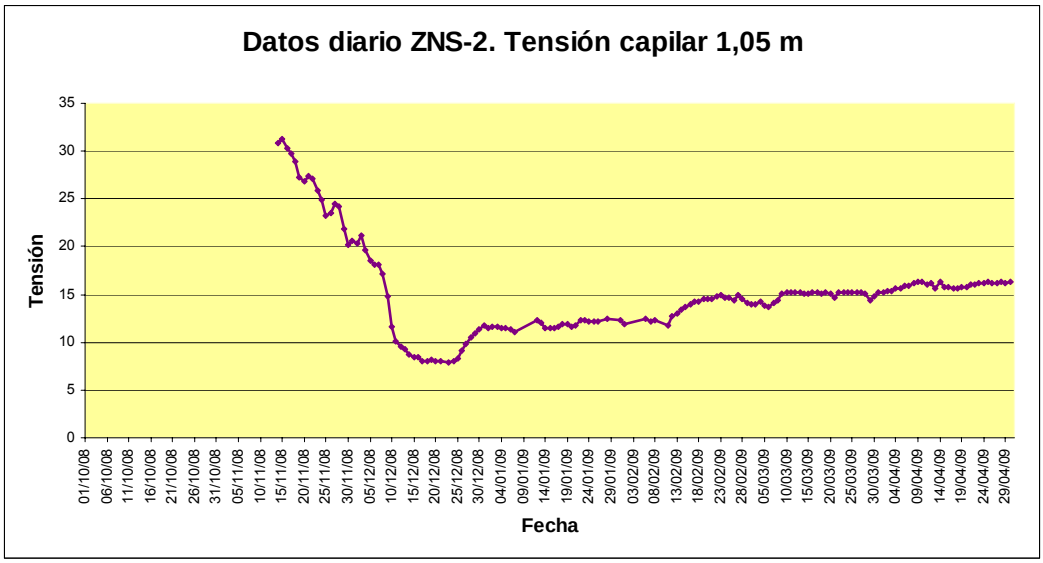


Figura 7-12. Gráfica de tensión capilar registrada en la estación DINA-MAR ZNS 2. Profundidad del sensor 1,05 m.

En las crestas de humedad de la segunda semana de diciembre, se aprecia un retardo entre el registro de las precipitaciones y la respuesta del humidímetro de en torno a una semana, lo que es atribuible a que las precipitaciones en este periodo fueron de nieve. El máximo creado tiene una línea descendente muy suave mientras había acumulación de nieve en superficie, de modo que la influencia parece estar activa durante aproximadamente quince días. Un suceso parecido se aprecia en las precipitaciones en forma de nieve de la primera semana de enero.

En ZNS-1 los valores de humedad registrados a 0,5 metros son menores que los registrados a dos metros, si bien hay dos valores correspondientes al 1 y 31 de diciembre en los que la humedad registrada a 0,5 metros es menor. Estos datos de apariencia anómala no han sido extraídos al no registrarse irregularidades en la tensión de la alimentación y al haber medidas similares tomadas durante un día cada 15 minutos.

El 25 de diciembre de 2008 el humidímetro ubicado a 2 m de profundidad entró en saturación al ser alcanzado por el avance del bulbo de humidificación del canal, en control lateral, distante 38 metros. El pozo 49 de la red de control presentaba el nivel freático a 2 metros bajo el nivel medio del terreno con fecha 14 de marzo. Este pozo se encuentra a 102 m del canal, y ambos en sentido “ascendente” del gradiente hidráulico,

es decir, aguas arriba de las líneas de flujo que presenta la cartografía hidrogeológica, de orientación suroeste-noreste. Con un gradiente hidráulico de 1%, y un tiempo de 80 días necesarios para alcanzar el bulbo al humidímetro desde el canal, la permeabilidad media resultante para este sector es: Kh es de 4,4 m/día y Kv resulta 0,32 m/día, tasa muy inferior a la obtenida en sectores cercanos del acuífero por otras metodologías, con valores cercanos a 15 m/día de Kh y de 0,5 de Kv (MAPA, 2005).

El avance del bulbo, por tanto, presenta una velocidad de entre 4 y 5 m /día en este sector, y la transmisividad resultante es en torno al intervalo 1.200-1.400 m^2/día. Repitiendo los cálculos entre el canal y el pozo nº 49, los parámetros son más cercanos a los límites superiores del intervalo.

La temperatura a 0,5 metros presenta fuertes oscilaciones con relación de proporcionalidad directa con las precipitaciones e inversa con la humedad. En torno al 10 de diciembre se registra un máximo, una cresta de unos cinco días, que también es registrada a 2,0 metros de profundidad aunque más suavizada y con dos días de retardo. En esta semana hubo precipitaciones de nieve, y el alojamiento del manto albo en superficie parece haber incrementado la temperatura de la ZNS con respecto cuando ha habido precipitaciones líquidas. La tendencia es descendente mientras progresa el bulbo de humidificación, hasta que el sensor entra en saturación.

La tensión capilar a un metro de profundidad presenta tendencia descendente, coincidiendo con las precipitaciones, que en este periodo fueron de nieve. A continuación y durante aproximadamente tres semanas (segunda quincena de diciembre y primera semana de enero) la tensión presenta un valle. El punto de inflexión viene a coincidir con dos días antes de que el humidímetro 2,0 m entrara en saturación. Antes de registrarse este incremento en la vertical, la tensión registra un máximo, atribuible a que el bulbo de humidificación había alcanzado la zona de oscilación (entre 2,0 y 2,4 metros de profundidad), si bien el ascenso del nivel no provoca un ascenso de tensión, sino una M mayúscula en la gráfica durante un intervalo de cinco días. Desde entonces la tendencia es creciente sin apenas rebotes.

En la estación ZNS-2 los valores de humedad registrados a 0,5 metros son también menores y semiparalelos que los registrados a 1,1 metros, si bien la gráfica es mucho menos suave. Al igual que en la estación previa hay un retardo entre la caída de la nieve y el incremento de humedad de unos tres días. El sensor más profundo no se ha llegado a saturar en este ciclo, si bien a partir del 20 de marzo aproximadamente hay una tendencia descendente clara, que coincide con un ascenso del nivel del agua en el pozo más cercano de menos de cinco centímetros bajo en sensor más profundo. De este modo, cuando más cerca está el nivel freático, menor es la humedad para este caso. En este tramo el material testificado es Arena marrón de grano medio con bastante grava y algo de arcilla, bajo un estrato con abundancia de cantos de cuarcita.

La temperatura en esta estación presenta un comportamiento peculiar. Presentan también un semiparalelismo los valores registrados a 0,5 y 1,1 m, con una curva más suave a mayor profundidad, si bien en torno al 18 de marzo, hay una inversión de tendencia, la temperatura del sensor más superficial es más caliente o similar, lo que parece que también está supeditado al ascenso del bulbo. Ambas gráficas presentan valores muy parecidos, separándose en un intervalo de fuertes precipitaciones, con mayores temperaturas el sensor más superficial.

La tensión presenta un carácter descendente con altibajos hasta las nevadas de la primera semana de diciembre, que traen un valle de morfología asimétrica de tres semanas de duración, coincidiendo con un periodo sin precipitaciones.

En general se aprecia un descenso en la tensión capilar en torno a dos días después de las precipitaciones.

El tramo en que se igualan las temperaturas en ambos sensores coincide con una línea muy tendida y ligeramente ascendente, hasta mediados de marzo, en que acontecen fuertes lluvias y se registra un nuevo aumento de la tensión.

CONCLUSIONES

En este capítulo se ha llevado a cabo un primer análisis de los datos de humedad, temperatura y tensión recogidos a lo largo de un ciclo de recarga artificial en estaciones de medida adyacentes al canal de recarga. Se ha controlado además el caudal circulante, la precipitación y la temperatura ambiente, lo que ha permitido iniciar correlaciones entre estos parámetros a escala diaria.

A tenor de las gráficas realizadas con una escala de tiempo similar ya presentadas, en general se advierte una respuesta inmediata de los humidímetros ante las precipitaciones. Los más someros (0,5 m) presentan una respuesta muy rápida con gráficas abruptas. Los más profundos presentan retardos de hasta 1 día y las gráficas son mucho más suaves. El efecto de la nieve conlleva un retardo, entre el registro de las precipitaciones y la respuesta del humidímetro, cercano a una semana en ambos casos.

En ZNS-1 se han registrado valores de humedad anómalos, muy desviados de la media durante un día, si bien todos los indicadores de tensión, etc. apuntan a que el aparato se encontraba midiendo correctamente. Estos datos son atribuibles a la influencia de fuertes precipitaciones y a la saturación de un sensor, si bien podría influir el asentamiento del terreno en torno a los sensores en su primer año de operatividad.

El 25 de diciembre de 2008 el humidímetro ubicado en la estación DINA-MAR ZNS-1, ubicado a 2 m de profundidad, entró en saturación al ser alcanzado por el avance del bulbo de humidificación del canal, en control lateral, distante 38 metros. El pozo 49 de la red de control presentaba el nivel freático a 2 metros bajo el nivel medio del terreno con fecha 14 de marzo. Este pozo se encuentra a 102 m del canal, y ambos en sentido “ascendente” del gradiente hidráulico, es decir, aguas arriba de las líneas de flujo que presenta la cartografía hidrogeológica, cuya dirección es noreste. En la estación dos, ubicado aguas abajo, el gradiente hidráulico deducido es muy superior, lo que induce a pensar en una morfología claramente asimétrica del bulbo de humidificación a ambos lados del canal, con pendiente tendida “aguas arriba” y pendientes en torno a cinco veces más inclinadas aguas abajo.

La permeabilidad horizontal, Kh, obtenida resulta en torno al 25% de la obtenida mediante ensayos de bombeo (en MAPA, 2005) en sentido “ascendente”. La vertical,

Kv, en torno a ZNS-1, es de un tercio de la que consta en los antecedentes. El gradiente hidráulico del canal de recarga artificial "aguas arriba" ronda el 1 %. En torno a ZNS-2 el flujo es muy superior, habida cuenta de la presencia de un estrato tipo "raña" de matriz arenosa. Aún así se han registrado valores de gradiente hidráulico de hasta el 6% aguas abajo del canal de recarga artificial. Por tanto, a falta de análisis más precisos, la asimetría parece ser importante, si bien no tan alta como en este caso, al variar la secuencia litológica en ambas estaciones.

La temperatura a 0,5 metros presenta fuertes oscilaciones con relación de proporcionalidad directa con las precipitaciones. Se correlaciona de manera inversa con la humedad. En ZNS-1 la tendencia es descendente mientras progresa el bulbo de humidificación, hasta que el sensor entra en saturación.

La tensión capilar a un metro de profundidad presenta tendencia descendente, coincidiendo con las precipitaciones. El registro presenta un valle, coincidiendo con los dos días previos a que el humidímetro 2,0 m fuera alcanzado por el bulbo de humidificación. Antes de registrarse el incremento en la vertical, la tensión registra un máximo, para luego descender, lo que lleva a interpretar en una primera aproximación que la llegada del bulbo de humidificación provoca una compresión del aire en la zona no saturada inicialmente, y luego una distensión. La forma extraña de la curva induce a aplicar técnicas adicionales, como podría ser el muestreo de *gas chambers*, etc.

En la estación ZNS-2 los valores de humedad registrados a 0,5 metros son también menores y semiparalelos que los registrados a 1,1 metros, si bien la gráfica es mucho menos suave. El sensor más profundo no se ha llegado a saturar en este ciclo (en el próximo se controlará mejor la represa más cercana), si bien a partir del 20 de marzo aproximadamente hay una tendencia descendente clara, que coincide con un ascenso del nivel del agua en el pozo más cercano de menos de cinco centímetros bajo en sensor más profundo. De este modo y en este caso, a medida que se acerca el nivel freático al sensor, la humedad ha presentado una tendencia descendente al menos durante dos días. Este suceso podría estar relacionado igualmente con el efecto del aire entrampado en el acuífero y movilizado por fuerzas externas.

La temperatura en esta estación presenta un comportamiento peculiar. En torno al 18 de marzo hay una inversión de tendencia, la temperatura del sensor más superficial es más caliente o similar, lo que parece que también está supeditado al ascenso del bulbo. Ambas gráficas presentan valores muy parecidos, separándose tan solo cuando acontecen fuertes precipitaciones.

En general se aprecia un descenso en la tensión capilar en torno a dos días después de las precipitaciones.

La temperatura registrada en los sensores guarda una cierta correlación inversa con los incrementos de humedad.

Estas observaciones abren la puerta a una interesante línea de investigación que acaba de empezar para este contexto concreto, tendente a aplicar técnicas SAT para reducir el efecto *Lisse* en torno a los canales de recarga artificial.

El hecho de haber calculado parámetros más bajos en la Kv en las inmediaciones de ZNS-1 introduce la necesidad de recalcular el balance hídrico modelado mediante HELP (en MAPA, 2005). La fracción de recarga natural infiltrada parece ser menor, al menos en esta zona, que la calculada.

BIBLIOGRAFÍA

- Fernández Escalante, A.E, 2005. Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales. Aspectos cualitativos y medioambientales. Criterios técnicos derivados de la experiencia en la Cubeta de Santiuste (Segovia). Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Enero de 2005.
- Gogolev & Ostrander. 2000. HELP. Hidrological Evaluation Landfill Performence. Manuel del programa. Waterloo Software, Canada, 2002.
- MAPA, 2005. Asistencia técnica para el seguimiento y modelización de la recarga artificial en la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia). Dirección General de Desarrollo Rural-TRAGSATEC (no publicado disponible para consulta en la biblioteca del MAPA).
- TRAGSA, 2008. DINA-MAR. Proyecto para la gestión de la recarga de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible. Memoria de la anualidad 2008. Grupo Tragsa. Documento interno no publicado.
- TRAGSA, 2008. Proyecto de obra de las estaciones DINA-MAR ZNS. Grupo Tragsa. Documento interno no publicado.

TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DE SUELO Y ACUÍFERO (SAT). RESULTADOS DEL PROYECTO DE I+D+i DINA-MAR Y APORTACIONES AL ESTADO DEL ARTE COMO APLICACIONES PRÁCTICAS. Por Enrique Fernández Escalante y Miriam W. Senent del Álamo.

La mayor parte de este capítulo representa una prolongación de una línea de acción iniciada en la tesis del primer autor, que ha sido posible prolongar en el tiempo gracias al proyecto de investigación.

RESUMEN

Entre las líneas de acción desarrolladas en el marco del proyecto DINA-MAR o gestión de la recarga de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible, una de las más importantes ha sido la adopción de técnicas de Tratamiento de Suelo y Acuífero (SAT) concretas en distintas litologías con objeto de incrementar la tasa de infiltración, la efectividad de los dispositivos existentes, y crear criterios de diseño para los futuros.

La línea de trabajo ha arrojado bastante luz sobre criterios técnicos para incrementar la efectividad de las actuaciones en acuíferos detríticos y dispositivos de tipo superficial, proponiendo varios binomios “problema-solución”, criterios de ingeniería y evaluaciones de riesgo y de impacto medioambiental.

En este artículo se sintetizan los más importantes, no obstante, aparecen descripciones más detalladas en las memorias anuales del proyecto y en el inventario de tipologías de dispositivos (capítulo 2), donde se remite al lector interesado.

INTRODUCCIÓN

Tras siete años de realizar ensayos y analíticas para el diseño de dispositivos de recarga artificial, esta línea ha desembocado en el diseño y la implementación de SATs aplicadas al agua de origen (tanto en cantidad como en calidad), al medio receptor y a la combinación de todos ellos.

Las técnicas SAT más utilizadas en la zona de estudio y sometidas a permanente investigación son:

- Estudio del mayor impacto que afecta a los dispositivos de AR: La colmatación (clogging).
- Influencia del periodo y caudal de recarga artificial en la tasa de infiltración y efectividad de los dispositivos (Los estudios se están llevando a cabo en canales y balsas).
- Actuaciones en la morfología del medio receptor (canales y balsas).
- Reducción de la entrada de aire en el acuífero en torno a los dispositivos de AR.
- Operaciones de limpieza y mantenimiento.

Cabe mencionar que en este artículo se ha empleado la connotación holandesa para SATs de Krul & Liefrinck, (1946), como técnicas para ser aplicadas para incrementar la tasa de infiltración de agua en el acuífero mediante intervenciones en el suelo, en el propio acuífero y en el agua a recargar. La aclaración viene a tenor de que en los últimos años hay una tendencia bastante extendida a aplicar este término para la gestión de la recarga con aguas procedentes de depuradoras, reduciendo su amplitud original.

A pesar de que este artículo podría resultar un tanto genérico, recoge el resultado de ocho años de investigación y toma de datos de forma muy resumida. Además, gran parte de la información presentada puede ser ampliada con las referencias bibliográficas.

OBJETIVOS

Los principales objetivos de este artículo son tres:

- Estudiar los problemas que afectan a los tres dispositivos de gestión de la recarga de acuíferos empleados como zonas piloto del proyecto de i+D+i DINA-MAR, que cuentan con hasta ocho años de operatividad, con objeto de cuestionar su idoneidad.

- Proponer varios binomios “problema-solución” con objeto de mejorar la efectividad de las instalaciones ya implementadas mediante la aplicación de técnicas SAT, criterios de ingeniería, evaluaciones de riesgos y de impacto ambiental. De este modo se genera un bucle continuo “nuevas deficiencias detectadas: nuevas mejoras”, incrementando así el estado del arte previo.

- Proponer un corolario de técnicas SAT para ser aplicadas en escenarios análogos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo metodológico ha consistido, básicamente, en el monitoreo y seguimiento de tres de los dispositivos de gestión de la recarga actualmente operativos en España: La Cubeta de Santiuste, la comarca del Carracillo, ambas en la provincia de Segovia, y el canal del Guadiana en Ciudad Real. Los dos primeros constan de balsas, canales y pozos de infiltración, mientras que el último está compuesto por una batería de 25 pozos que rondan los 75 m de profundidad.

En la recopilación de datos se ha prestado especial atención a aquellos relacionados con la permeabilidad y la evolución de la tasa de infiltración “in situ”. Para ello se han empleado infiltrómetros de doble anillo, ensayos tipo *Lambe* y *Lugeon*, así como datos obtenidos en laboratorio con permeámetro triaxial a partir de probetas. Así mismo se han llevado a cabo campañas de aforos secuenciales a lo largo de los canales de gestión de la recarga.

La variación del almacenamiento en cada acuífero se lleva a cabo mediante el método "Water Table Fluctuation o WTF" (Healy & Cook, 2002), a partir de la medición de las Redes de Control, constituidas por más de 50 puntos de agua en cada caso, y el tratamiento de esta información mediante operaciones de álgebra de mapas a partir de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

La disociación del volumen infiltrado procedente de la gestión de la recarga y de la lluvia se ha llevado a cabo aplicando el modelo denominado "Hydrological Evaluation Landfill Performance o HELP" (Gogolev & Ostrander, 2000) y por medio de balances hídricos zonales en sectores del acuífero que presentan un cierto aislamiento hidráulico por barreras hidrogeológicas de cierta magnitud.

El studio del volumen de aire que penetra en el acuífero a través de las instalaciones de gestión de la recarga y el monitoreo de los parámetros de la Zona No Saturada (ZNS) se ha llevado a cabo mediante humidímetros, termómetros y tensiómetos conectados a sistemas de registro tipo data-loggers e integrados en unas estaciones de medida designadas estaciones DINA-MAR ZNS.

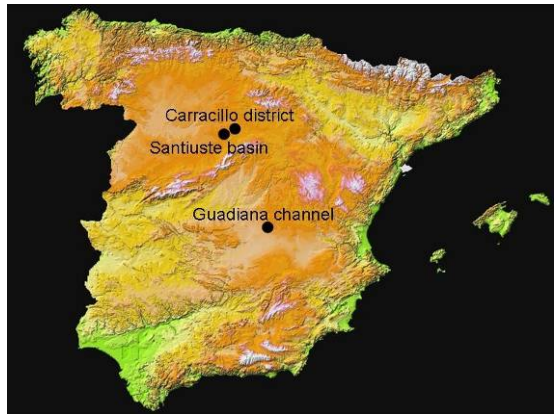


Figura 7-13. Instalaciones de gestión de la recarga (MAR) en las que se ubican las zonas piloto donde se han llevado a cabo los ensayos precisos para redactar este texto. 1- Cubeta de Santiuste, 2- Comarca del Carracillo (provincia de Segovia) y 3- Canal del Guadiana (Ciudad Real).

RESULTADOS Y DISCUSION

Estudio de los impactos de mayor magnitud e intensidad y de diseños inadecuados que afectan a los dispositivos de gestión de la recarga

Los principales problemas localizados y líneas de acción emprendidas para solventarlos en los tres dispositivos de gestión de la recarga mencionados han sido:

1-2. Al ser un dispositivo de tipo superficial, se han analizado alternativas para la recarga en zonas con gran ocupación del terreno y pinares, donde no se podían implantar dispositivos de recarga de tipo superficial. Para ello se han estudiado y

testado maneras de intercalar dispositivos subsuperficiales intercalados en las propias conducciones que dirigen el agua procedente de los ríos de toma hacia los sistemas de MAR.

3. Las presas originarias han sido modernizadas facilitando la depuración del agua a través del aluvial del río y su posterior captación en pozos cercanos, facilitando así el uso de dispositivos tipo River Bank Filtration (RBF)o de filtración en el banco de los ríos. Se entiende por "banco" la zona de aluviones cercana a las orillas de alta permeabilidad y relativa capacidad de depuración y filtración de finos.

4-5. En todos los casos estudiados se han detectados problemas originados por la entrada de aire al acuífero junto con procesos de colmatación física (especialmente en pozos de infiltración de gran diámetro, por el fondo de las balsas y canales e incluso en sondeos). Los dispositivos de parada emplazados a lo largo de los canales y en los tramos de conexión con las tuberías de abastecimiento de las balsas y pozos, según se ha comprobado, producen un aumento de la concentración de oxígeno disuelto en el agua de gestión de la recarga y una reducción en la tasa de infiltración, lo que en la mayoría de las ocasiones conduce a la detección de un cierto efecto *Lisse* (Krul & Liefrinck, 1946). De acuerdo con los cálculos llevados a cabo en la cubeta de Santiuste empleando las técnicas de Blaxejewski, 1979, el volumen de infiltración disminuyó hasta un 25 % en el acuífero detrítico arenoso en el segundo ciclo de gestión de la recarga (2003-2004) con respecto al primero, por la acción conjunta del aire entrampado en los poros y por la colmatación.

6-7. Algunos elementos relacionados con el funcionamiento hidrogeológico del sistema experimentaron variaciones, tales como cambios en la calidad de las aguas de humedales adyacentes, cambios en el caudal de los manantiales, etc. Estos problemas han requerido estudios específicos, en general basados en diseños especiales de recarga artificial inducida.

8. Los problemas de colmatación en las balsas de infiltración aparecen a distintas profundidades, no solo en superficie. Se ha detectado la generación de costras carbonatadas en sectores del acuífero con un quimismo reductor de las aguas subterráneas o bien originados por recargar durante ciclos de helada.

9. Diseños inadecuados de pozos y sondeos de recarga que permiten la entrada de finos, abundante entrada de aire en el acuífero y limitada infiltración, en general por aprovechar pozos abandonados preexistentes.

10. Se ha detectado la distribución desigual de los procesos colmatantes tanto en la horizontal como en la vertical. Por ejemplo, en los taludes de las balsas y canales su distribución es desigual, lo que trajo la necesidad de modificar la morfología de los canales y balsas y diseñar técnicas específicas de limpieza.

La figura 7-14 sintetiza la información hasta aquí presentada en este apartado:

Figura 7-14. Ejemplos y posición de los mayores impactos y diseños inadecuados detectados que afectan a las instalaciones de MAR y algunas líneas de acción a adoptar. Modificado de Fdez. Escalante, 2005.

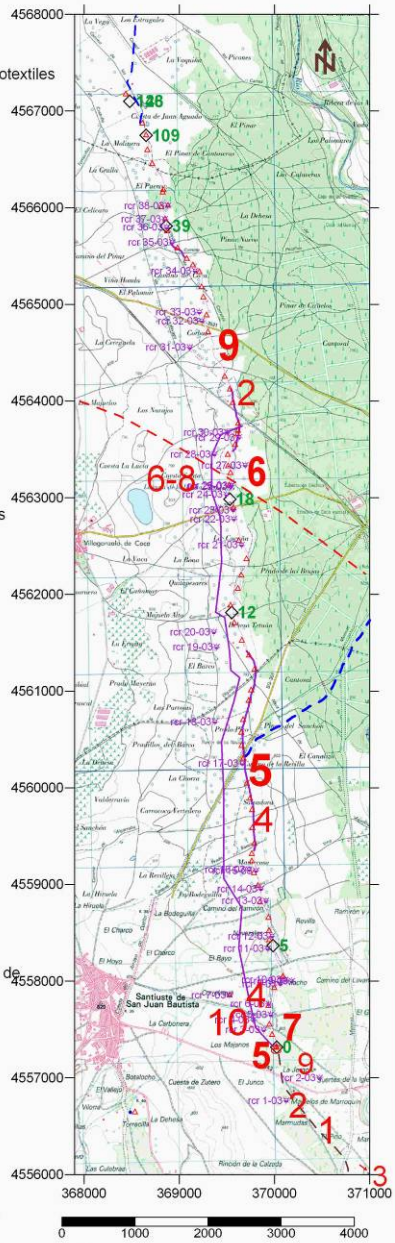
10- Ensayos en canales dotados de geotextiles para aislar distintos tramos

6-8 Regeneración hídrica de humedales mediante técnicas MAR

4- Pozo MAR de gran diámetro

2- tuberías ciegas atravesando zonas de altas tasas de infiltración

1- Instalación de la tubería en el suelo arenoso



9- Mejoras en los diseños de los sondeos de inyección

7- Diseños de caballones en el fondo de las balsas de infiltración

5- Dispositivos de parada generando "efecto cascada"

3- Sistemas RBF junto a presas

LEYENDA:

- Núcleos urbanos
- Red hidrográfica
- Carreteras
- Vía del tren de alta velocidad
- 1-10 Localización de los dispositivos SAT
- Canales de MAR
- Canales MAR en zonas poco permeables
- Tuberías de conducción
- Cabecera del dispositivo
- Dispositivos de parada aliviaderos del canal
- Piezómetros de observación
- 0 **Presa en el río Voltoya (origen del agua para MAR)**

INSTALACIONES DE LA CUBETA DE SANTIUSTE
PROBLEMAS OPERATIVOS DETECTADOS

Propuestas de diseño e implementación de Técnicas de Tratamiento de Suelo y Acuífero (SATs) y diseños estructurales

Las soluciones propuestas a los impactos ambientales y disfunciones mencionados han contado con varios años de investigación y progresiva mejora. Las actuaciones han sido, en general, un proceso reiterativo, hasta el punto de que todavía quedan varios problemas sin resolver de forma adecuada y diseños pendientes de construcción. No obstante, los dispositivos actuales presentan destacables mejoras cuantitativas y cualitativas frente al diseño inicial construido hace 8 años. Las principales actuaciones llevadas a cabo, presentadas en el mismo orden de la exposición de motivos, han consistido en:

1-2. Los dispositivos de recarga intercalados en las conducciones han consistido en la intercalación de tuberías troqueladas y tramos filtrantes para la recarga *"in itinere*", así como la intercalación de filtros para el tratamiento previo del agua en la misma conducción. Estos tramos se encuentran rodeados de grava en dispositivos tipo "zanja drenante". Cuentan además con un programa de mantenimiento basado en la sustitución periódica de la grava.

3. La construcción de presas para la toma del agua del río ha ido acompañada de la perforación de pozos de iniciativa privada basados en sistemas RBF puntuales junto a las presas de toma para la recarga artificial o del canal de Guadiana.

4, 5-9. Los nuevos pozos de recarga artificial construidos han contado con un diseño específico basado en la intercalación de decantadores y filtros, diámetro elevado y perforación de un sondeo en su interior. Gran parte de los diseños aplicados están inspirados en los trabajos de Bouwer, 1999 y 2002 y Olsthoorn, 1982. Se están probando además sistemas de vasos comunicantes en todos los dispositivos de parada y vertederos para minimizar la aireación, así como surgencias bajo el nivel del agua, minimizando el efecto cascading en las construcciones. En general se ha conseguido reducir la entrada de finos y aire en el acuífero y mayores tasas de infiltración

6-7. Se han diseñado dispositivos para conseguir la modificación inducida de la calidad de las aguas de recarga artificial destinada a fines medioambientales. En el caso de la regeneración hídrica de un humedal salino localizados al margen del acuífero (Laguna de la Iglesia), se ha construido un vertedero donde se fuerza la interacción de las sales naturales que yacen en la zona con las aguas de gestión de la recarga, preservando así su calidad. De este modo, con alta superficie de interacción y poco tiempo, se compensa el mucho tiempo de residencia y menor superficie de contacto con que se generan las aguas de estos humedales, producidos por el ascenso de flujos profundos de aguas subterráneas.

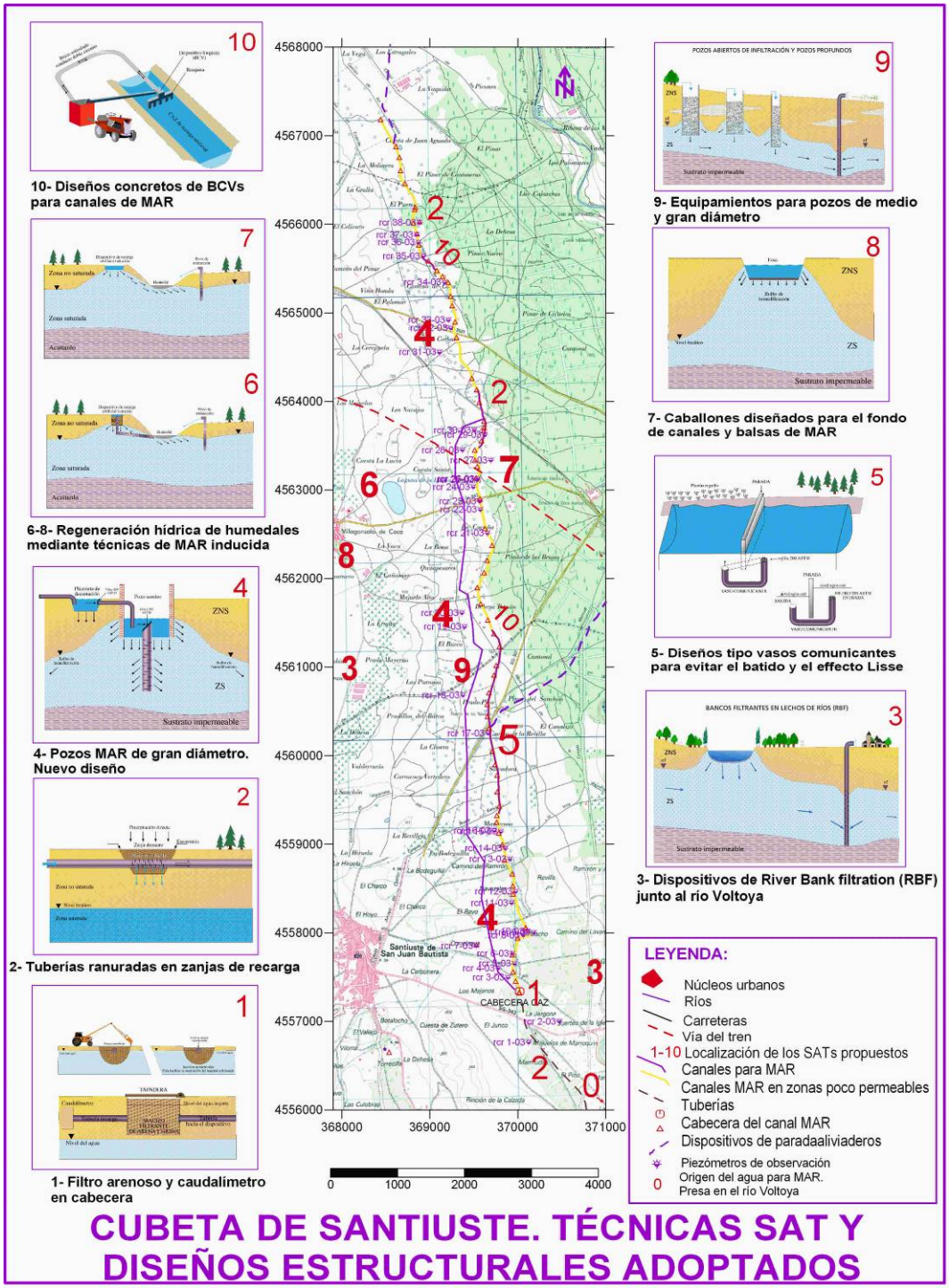
8. Las actuaciones en el fondo de las balsas de infiltración han consistido en estudiar la formación y distribución de procesos colmatantes en la horizontal y vertical. Se han ensayado en balsas piloto el arado de caballones con distintas longitudes de onda, y efectuado varios ensayos de infiltración con frecuencia anual. En general los caballones equidistantes 80 cm han dado los valores de infiltración más altos. En el caso de los canales se ha geotextiles reemplazables en los surcos, lo que facilita la recolección de

finos y su reemplazo por terreno natural limpio. Se ha diseñado además un programa de recarga con control manual de la válvula dependiente de las circunstancias climáticas. En general se está minimizando la recarga artificial en días de helada para prevenir la formación de costras carbonatadas.

10. Los taludes construidos en los canales, tras varios ensayos, se realizan con pendiente 2:3, al haberse constatado una mayor tasa de infiltración por las paredes. En arenas finas se ha optado por taludes 1:1 dada su mayor durabilidad. Para mejorar las operaciones de limpieza y mantenimiento, se ha diseñado un vehículo para la limpieza de la cuenca o *Basin Cleaning Vehicle* (BCV) específico adaptado a la morfología del canal y basado en el empleo de maquinaria tradicional con modificaciones estructurales de fácil montaje y desmontaje.

La descripción detallada de los dispositivos menos modernos se encuentra en la bibliografía (Fdez. Escalante, 2007). Las actuaciones específicas para canales y balsas pueden ser consultadas en Fdez. Escalante *et al,* 2009. Algunos parámetros de gestión se encuentran en Pérez-Paricio, 2007.

Figura 7-15. Propuesta de técnicas SAT y diseños estructurales para la solución de los mayores impactos detectados y diseños inadecuados que afectan o afectaban a las instalaciones MAR. Ejemplo para la Cubeta de Santiuste (los resultados de las restantes zonas piloto también se han sintetizado en la cartografía): 1-2. Tramos filtrantes intercalados en tuberías que atraviesan zonas con escasa disponibilidad de terreno superficial. 3- Nuevos sistemas RBF cercanos a los embalses de toma. 4- Diseños mejorados para pozos MAR de gran diámetro. 5- Dispositivos para reducir la concentración de aire disuelto en el agua de recarga. 6-7- Regeneración hídrica de humedales por dispositivos de MAR inducida. 8-9. Diseños para reducir la colmatación y el efecto Lisse en los pozos, canales y balsas de infiltración. BCV específicos para estas zonas piloto. Modificado de Fdez. Escalante, 2005.


10
10- Diseños concretos de BCVs para canales de MAR
7
6
6-8- Regeneración hídrica de humedales mediante técnicas de MAR inducida
4
ZNS
ZS
Sustrato impermeable
4- Pozos MAR de gran diámetro. Nuevo diseño
2
2- Tuberías ranuradas en zanjas de recarga
1
TAPONERA
1- Filtro arenoso y caudalímetro en cabecera
4568000
4567000
4566000
4565000
4564000
4563000
4562000
4561000
4560000
4559000
4558000
4557000
4556000
368000
369000
370000
371000
0
1000
2000
3000
4000
Santiuste de San Juan Bautista
CABECERA DAZ
9
POZOS ABIERTOS DE INFILTRACIÓN Y POZOS PROFUNDOS
9- Equipamientos para pozos de medio y gran diámetro
8
7- Caballones diseñados para el fondo de canales y balsas de MAR
5
5- Diseños tipo vasos comunicantes para evitar el batido y el efecto Lisse
3
BANCOS FILTRANTES EN LECHOS DE RÍOS (RBF)
3- Dispositivos de River Bank filtration (RBF) junto al río Voltoya
LEYENDA:
Núcleos urbanos
Ríos
Carreteras
Vía del tren
1-10 Localización de los SATs propuestos
Canales para MAR
Canales MAR en zonas poco permeables
Tuberías
Cabecera del canal MAR
Dispositivos de paradaaliviaderos
Piezómetros de observación
0 Origen del agua para MAR. Presa en el río Voltoya
CUBETA DE SANTIUSTE. TÉCNICAS SAT Y DISEÑOS ESTRUCTURALES ADOPTADOS

Corolario de técnicas SAT para aplicar en escenarios análogos

Los resultados de todos estos ensayos y el estudio del estado del arte a nivel mundial han permitido proponer el siguiente corolario operativo, diseñado con la finalidad de presentar un elenco de opciones que pueden ser aplicadas en escenarios homólogos para combatir problemas e impactos que afectan a los dispositivos de gestión de la recarga. Se trata, por tanto, de un sistema de ayuda para la toma de decisiones.

Se han diferenciado cuatro tipo de operaciones: para aplicar en las aguas de recarga desde su fuente original (en cantidad y calidad), en el medio receptor (tanto en el suelo como en el acuíferos), en la combinación de ambos, así como en los parámetros de gestión, incluyendo las operaciones de limpieza y mantenimiento.

Se ha optado por presentar el corolario de técnicas en formato figura (figs. 7-16 a) y b)).

Agua de recarga (cantidad)

- Almacenamiento temporal en reservorios superficiales.
- Control velocidad circulación aguas recarga.
- Evitar operaciones durante ciclos de helada.
- Empleo de cámaras termostáticas.
- Criterios selectivos origen.
- Limpieza y mantenimiento.
- Empleo BCVs.

Agua de recarga (calidad)

- Preselección: Criterios selectivos origen aguas de recarga. Filtración y decantación aguas AR, etc. (membranas, líneas de fangos, filtros, empaques, etc.).
- Trampas de escorrentía y estructuras de decantación y remanso.
- Dispositivos anticorrosión.
- Diseño y preservación taludes (mampostería, gaviones, etc.).
- Diseño fondo en acanaladuras o furrows, empleo geotextiles.
- Limitación altura lámina de agua. Pretratamiento tipo DBPs (Disinfection by Products): Cl, I, O3, H2O2, rayos UV, etc.
- Limpieza vegetación durante AR/ plantación específica en periodo estival.
- BCVs.
- Evitar aireación aguas AR: vasos comunicantes, estructuras exentas, velocidad aguas, Desaireación por piezómetros, aumento distancia puntos inyección-extracción, etc.
- Sistemas duales: Secado de algas, secado natural del lecho, criotratamiento, agrietamiento cake, escarificación de la parte colmatada y limpieza/reemplazamiento.
- Aislamiento con la atmósfera/luz solar.
- Medaka.
- Lechos filtrantes y aditivos químicos para la eliminación de costras calcáreas (ácidos, hidróxido sódico, quelantes, polifosfatos, defloculantes, etc.
- Evitar efecto reciclaje.
- Desnitrificación, "anammox", riego seleccionando profundidad emplazamiento bomba.
- Evitar la salinización natural: recarga puntual y barreras en zonas salinas.

Medio receptor (suelo y acuífero)

Pretratamiento del agua de recarga.
Secado natural del lecho y agrietamiento.
Criotratamiento.
Empleo de sistemas duales que permitan la limpieza de ur
mientras el otro está operativo.
Bombeo inverso en pozos cercanos al caz.
Alternancia de bombeo normal e inverso (Wash in- Wash out).
Lavado inverso (backwashing) en geotextiles, membranas y filtros.
Empleo de técnicas de limpieza tipo jet.
Técnicas de regeneración en pozos de recarga mecánicas (cepillado y arañado de paredes y fondo) y químicas (empleo de aditivos químicos).
Técnicas de limpieza con la mayor cadencia posible.
Bombeo diario del pozo de inyección.

Criterios / códigos de gestión / buenas prácticas

Parámetros de gestión y técnicas ex situ

- Elección del periodo y lugar más idóneos
- Inicio ciclos AR "suaves".
- Control caudal de entrada y su velocidad.
- Seguimiento del quimismo de las aguas durante el ciclo de recarga.
- Empleo de dispositivos de no afección a fauna y personas.
- Adoptar con prontitud las MTD

· Programa de Vigilancia y Control

- Protocolo específico de control de la colmatación.
- Protocolos de los aspectos hidromecánicos correctos en el espacio y tiempo.
- Sistema integral- todos los elementos están interelacionados.

· Código de Buenas Prácticas SAT

- Limitación en el abonado.
- Intervención agricultores en gestión.
- Instalación depuradoras y minimizar vertido efluentes.
- Perímetro de protección.
- Regulación del uso público.

Figuras 7-16 a) y b). Corolario. Listado de opciones para resolver problemas que afectan a dispositivos MAR mediante técnicas SAT, nuevos diseños y cambios en los parámetros de gestión. Las operaciones pueden se aplicadas en las aguas de recarga (en cantidad y/o calidad), en el medio receptor (suelo y/o acuífero) y en los parámetros de gestión, limpieza y mantenimiento. Modificado de Fdez. Escalante, 2005.

CONCLUSIONES

Tras ocho años de operatividad de tres dispositivos de gestión de la recarga de acuíferos en España, se han detectado impactos ambientales negativos y deficiencias solventables. Gran parte de ellos se están resolviendo mediante la adopción de técnicas SAT, nuevos diseños estructurales y cambios en los parámetros de gestión.

La mayor parte de los impactos detectados corresponden a procesos colmatantes (mayor escala e intensidad), entrada excesiva de aire en el acuífero en el agua de recarga y escaso pretratamiento del agua de recarga. Este se consolida como la alternativa más efectiva para el correcto funcionamiento de los dispositivos y para prolongar su vida media.

Los cambios en los diseños y en los parámetros de gestión deben ser elaborados “a la carta”, conforme al clima y a las características de cada sistema.

Se ha propuesto un corolario con la finalidad de presentar una serie de opciones a tener en cuenta a la hora de plantearse la resolución de un problema que afecte a dispositivos de gestión de la recarga de tipo superficial, como instrumento gráfico de ayuda a la toma de decisiones.

El proceso iniciado es abierto, cada mejora aplicada se convierte en un nuevo elemento a mejorar, por lo que las experiencias propias deben estar complementadas con la vigilancia tecnológica de las mejores técnicas disponibles que vayan surgiendo en escenarios análogos.

BIBLIOGRAFÍA

- Blaxejewski, M. (1979). “Gases in the ground and their effect during artificial recharge of groundwater”. Int. Symp. On Artificial Groundwater Recharge. Dortmund. Vol. IV, paper VI. 4. DVWK, Bull. 14. Verlag Paul Parey. Hamburg-Berlín. Pág. 59-70.
- Bouwer, H. (1999). “Artificial recharge of groundwater: Systems, design, and management”. In: Mays LW (ed.) Hydraulic design handbook. McGraw-Hill, New York, Pág. 24.1–24.44
- Bouwer, H. (2002). “Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering”. Hidrogeology Journal, Vol. 10, nº 2, April 2002.
- DINA-MAR. Memorias anuales. Anualidades 2007, 2008 y 2009. Grupo Tragsa. No publicadas.
- Fernández Escalante, A.E. (2005). “Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales. Aspectos cualitativos y medioambientales. Criterios técnicos derivados de la experiencia en la Cubeta de Santiuste, Segovia”. Tesis. Universidad Complutense de Madrid.
- Fernández Escalante, A.E. (2006). “Técnicas de tratamiento de suelo y acuífero (S.A.T.) aplicadas a la gestión de la recarga artificial”. Serie Hidrogeología Hoy. Grafinat, Noviembre de 2006. http://www.metodografico.com/publicaciones.htm
- Fernández Escalante, A.E, García Asensio, J.M. y Minaya Ovejero, M.J. (2009). “Propuestas para la detección y corrección de impactos producidos por procesos

colmatantes en el dispositivo de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste (Segovia)". Boletín Geológico y Minero, Vol. 120, nº 2, 2009. Pág. 215-234.

- Gogolev, M. y Ostrander, M. (2000). "Estimating groundwater recharge with Visual HELP model" Proceedings of the IAH 2000 Congress in South Africa, Nov. 2000.
- Healy, R. y Cook, P. (2002). "Using groundwater levels to estimate recharge." Hydrogeology Journal Vol. 10, Np 1. feb. 2002. AIH-Springer.
- Krul, W.F y Liefrinck, F.A. (1946). "Recent groundwater investigations in the Netherlands." Monograph on the progress of research in Holland. Elsevier, New York, 78 Pág.
- Olsthoorn, T.N. (1982). "The clogging of recharge wells, main subjects." KIWA-communications 72, Working group on recharge wells (Rijswijk, The Netherlands), 136 Pág.
- Pérez-Paricio, A. (2007). "Managed aquifer recharge (groundwater artificial recharge) operation tools" 1st Workshop Reclaim Water-Gabardine, Barcelona, Spain 2007.

CAPÍTULO 8. HIDROGEOLOGÍA E INGENIERÍA CIVIL

CRITERIOS TÉCNICOS PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DE LA RECARGA EN BALSAS Y CANALES TRAS SIETE AÑOS DE GESTIÓN EN LOS DISPOSITIVOS DEL ACUÍFERO DE LOS ARENALES (CUBETA DE SANTIUSTE Y COMARCA DEL CARRACILLO). Por Enrique Fernández Escalante y Óscar Martínez Tejero.

RESUMEN

Durante los siete años de operatividad de los dispositivos de recarga artificial de acuíferos o Managed Aquifer Recharge (en adelante MAR) construido por el Ministerio de Medio ambiente, Rural y Marino (MARM), antiguo Ministerio de Agricultura (MAPA) y la Junta de Castilla y León (JCL) en los Arenales (acuífero arenoso eólico principalmente), en concreto en la Cubeta de Santiuste y comarca del Carracillo (Segovia), se ha llevado a cabo un seguimiento simultáneo a la recarga artificial, estudiando los puntos fuertes y carencias de los dispositivos (canales, balsas y pozos de gran diámetro).

De este modo se está caminando hacia diseños de alta eficiencia en el marco de la gestión hídrica para el regadío, con vistas a su uso futuro para el abastecimiento urbano en este acuífero y otros análogos.

INTRODUCCIÓN

En este artículo se describe la experiencia de siete años en dos “laboratorios experimentales” y cómo este monitoreo ha permitido diseñar y llevar a cabo mejoras derivadas de la experiencia encaminadas a incrementar la tasa de infiltración, tales como:

- En un entorno preoperacional: Tipificar estudios hidrogeológicos de detalle para objetivos concretos, selección de las técnicas de prospección más óptimas, etc.

- Sinoperacional: Mejoras aplicables a la obra civil (construcción de los dispositivos y obras de modificación de los ya existentes), establecer criterios de operatividad tales como el control “manual” de la entrada de caudales acorde con la climatología, el pretratamiento y la corrección de la calidad de las aguas de origen fluvial *“in itinere*”, y especialmente, la adopción de técnicas de tratamiento de Suelo y Acuífero (SATs) para reducir la entrada de aire al acuífero y minimizar la colmatación.

- Postoperacional: El vertido de aguas depuradas en los canales durante el semestre en que no hay recarga artificial de origen fluvial, criterios de limpieza y mantenimiento, reducción de los procesos colmatantes, etc.

Marco de actuación

El acuífero de Los Arenales o Unidad hidrogeológica 02-17 tiene una extensión de 1.504 km^2 localizada íntegramente en la Comunidad autónoma de Castilla y León. Su origen es poligénico, predominando las facies Arévalo, arenas de un sistema dunar cuatenario de espesor variable (hasta 50 m) que rellenan un sustrato de relieve complejo de edad miocena, bien arcilloso (facies Cuestas) o areno-arcilloso (Puente Runel).

La explotación del acuífero cuaternario superficial ha sido creciente en las últimas décadas, motivando el descenso del nivel freático una media de 10 m, con procesos de salinización y contaminación aparejados. Por consiguiente, se están ensayando tres dispositivos de gestión de la recarga de acuíferos para regadío, localizados en la figura 8-01.

Las primeras experiencias de AR en Los Arenales se llevaron a cabo en La Moraña, donde se realizó un profundo estudio para determinar las posibilidades de AR, tanto en el acuífero superficial como en compartimentos más profundos del acuífero. Finalmente esta opción fue rechazada con aguas fluviales, ante la dificultad de derivar agua de los ríos principales, quedando la opción de recargar con aguas depuradas, opción ahora en desarrollo.

La Cubeta de Santiuste es un acuífero bastante bien conocido gracias a las actuaciones llevadas a cabo por el MAPA y actividades de I+D+i. Se encuentra en el sector oeste de la provincia de Segovia y sureste de Valladolid. Ubicada en la margen izquierda de los ríos Voltoya y Eresma, cuenta con una superficie de 48 km^2 y 600 ha de regadío. La actividad de recarga artificial (en adelante AR) empezó en 2002/03, con un canal único con balsas intercaladas, que ha sido ampliado sucesivamente hasta la actualidad. El volumen infiltrado al acuífero ha oscilado entre 0,97 (ciclo 2004/05) y 12,19 hm^3 (2006/07). El dispositivo cuenta con 8 años de operatividad y consta en la actualidad de 27 km de canal de infiltración, 5 balsas de infiltración, 3 pozos para MAR, un sistema RBF (River Bank Filtration) y tres humedales artificiales.

La comarca del Carracillo está localizada a aproximadamente 40 km hacia el este desde la zona precedente. Ocupa una extensión cercana a 150 km2 y se ubica en el interfluvio de los ríos Cega y Pirón. Cuenta con una extensa cultura de regadío, con al menos 2.700 ha regadas con aguas subterráneas. Cuenta con cierta tradición en recarga artificial mediante acequias sin revestir, si bien los primeros dispositivos de cierta envergadura comenzaron a funcionar en el invierno de 2006/07, introduciendo 8 hm3 al acuífero, cifra incrementada a 12 hm3 en el ciclo 2009/10. Está integrado por 40,7 km de canal para MAR, 3 balsas de infiltración, un sistema RBF y dos humedales artificiales.

La descripción más detallada de estos dispositivos se encuentra en Fernández y López, 2002 y Fernández *et al*, 2009. Estos dispositivos constituyen los principales "laboratorios experimentales" del proyecto de I+D+i DINA-MAR y del Grupo Tragsa desde 2002.

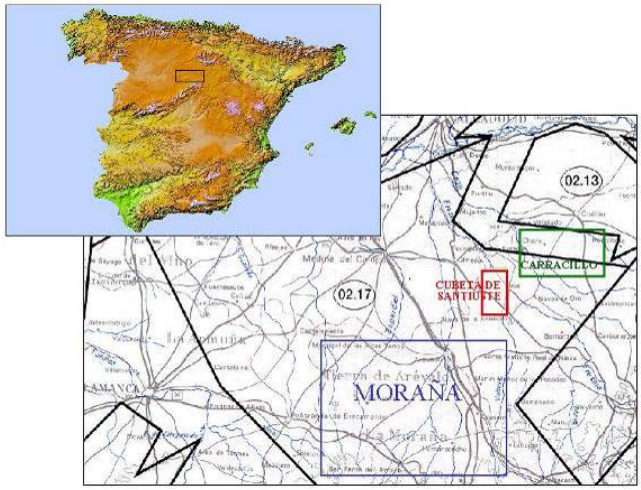


Figura 8-01. Posición geográfica del acuífero de Los Arenales, también llamado Unidad Hidrogeológica 02-17, y su posición dentro de España (mapa a escala 1:200.000).

OBJETIVOS

Los principales objetivos son el estudio de la evolución de la recarga artificial en los últimos ocho años, especialmente en cuanto a evolución de la tasa de infiltración y volumen de agua infiltrado; con objeto analizar el funcionamiento de los canales y balsas y mejorar su efectividad mediante mejoras estructurales y/o técnicas de Tratamiento de Suelo y Acuífero (SATs).

MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales empleados han sido variados y tendentes a la adquisición de datos. Cabe destacar los utilizados para determinar permeabilidades y tasas de infiltración *in situ* (infiltrómetro de doble anillo, balsas piloto y ensayos de Lugeon y Lambe), tomamuestras, etc. La variación del almacenamiento en el acuífero se ha estudiado por el método WTF o *Water Table Fluctuation* (Healy & Cook, 2002).

El studio de la Zona No Saturada (ZNS) se lleva a cabo mediante dos paquetes de sensores integrados en las llamadas estaciones de telecontrol DINA-MAR ZNS, que constan de humidímetros, termómetros y tensiómetros conectados a data-loggers. Registran en continuo 5 parámetros en las inmediaciones de un canal de AR. Los sensores están dispuestos de modo transversal al canal, con objeto de detectar y cuantificar el avance del bulbo de humidificación y conocer su morfología, así como estimar el aire retenido en los poros del suelo (en Fernández, 2009).

Una técnica adicional ensayada a partir de 2010 ha sido el empleo de una cámara termográfica modelo Therma-Cam E2 de Flyr systems, con objeto de estudiar la

distribución de la colmatación por la diferente temperatura que adquieren estos con respecto a las zonas sin colmatar, lo que se manifiesta en distintas coloraciones.

RESULTADOS Y DISCUSION

Estudios de la influencia del periodo y caudal de recarga artificial en la tasa de infiltración y de su manejo para aumentar la efectividad de los canales y balsas

PERIODO

La evolución de la tasa de infiltración en un punto del canal Este de Santiuste a lo largo del ciclo de gestión de la recarga (2004-05) fue controlada mediante la ejecución de ocho ensayos de infiltración en un tramo del canal especialmente confinado y acondicionado (tabla 8-01 & figura 8-02). Esta gráfica presenta una morfología acorde con la curva "tipo" de Blaxejewski, 1979.

DAY Nº AR CYCLE (2004/05)	INFILTRATION RATE(mm/year)
1 (01/10/2004)	35
7	159
14	140
19	315
39	301
108	300
126	291
149 (26/02/2005)	289

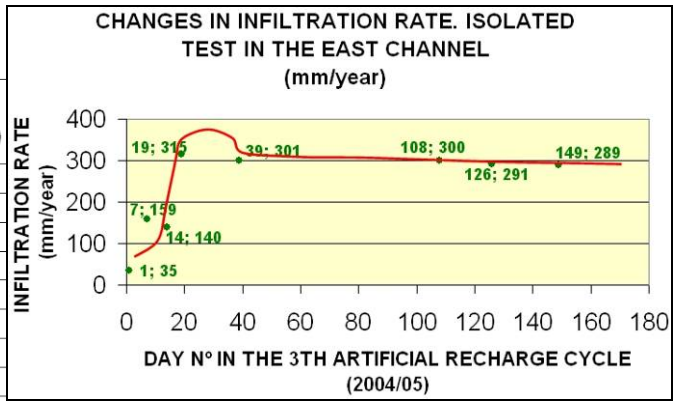


Tabla 8-01 y figura 8-02. Tasa de infiltración a lo largo del ciclo de AR 2004/05 en una zona aislada del canal de Santiuste dentro del canal Este.

En dicha gráfica se aprecia una tendencia creciente y constante de la tasa de infiltración desde el primero de noviembre en que empieza la concesión, hasta alcanzar un máximo en torno al mes de iniciarse la recarga artificial y hasta la caída térmica de los primeros días de diciembre. La saturación, el aire entrampado en los poros del acuífero y las bajas temperaturas motivan el descenso durante, aproximadamente, una quincena.

El resto del ciclo de recarga artificial presenta una tendencia ligeramente descendente durante el resto del invierno (los ciclos de helada parecen provocar un retardo en el ascenso en la tasa de infiltración). Llegado un punto ligeramente después de la mitad del periodo (febrero-marzo), el acuífero ha entrampado importante volúmenes de aire (hasta un 35% conforme a las referencias bibliográficas, en Stuyfzand, 2002), que puede ir acompañado de efecto Lisse (Krul & Liefrinck, 1946). Este aire atrapado no ha sido cuantificado en este laboratorio experimental, si bien se ha apreciado su presencia e influencia negativa en la recarga artificial, a tenor de las variaciones registradas en los tensiómetros de las estaciones DINA-MAR ZNS. Los últimos ensayos permiten estimar

que el aire llega al 25 % al final del segundo mes de AR. Al acercarse la primavera, con la desaireación, la curva presenta una morfología más o menos constante. El resultado final es una disminución de la tasa de infiltración, acumulativa en sucesivos ciclos.

Los aspectos operativos derivados de este estudio van encaminados al control manual de la válvula de entrada, en función del caudal circulante y cerrando durante los ciclos de helada, control que llevan a cabo las comunidades de regantes con asesoramiento de DINA-MAR.

VOLÚMENES DE AGUA EMPLEADOS PARA LA TÉCNICA MAR

Los caudales derivados del río Voltoya para MAR frente a la variación del volumen almacenado en el acuífero para el mismo escenario y para los ciclos entre 2002 y 2005, cuando fue ampliado el dispositivo construyendo un nuevo canal, quedan sintetizados en el gráfico 8-03.

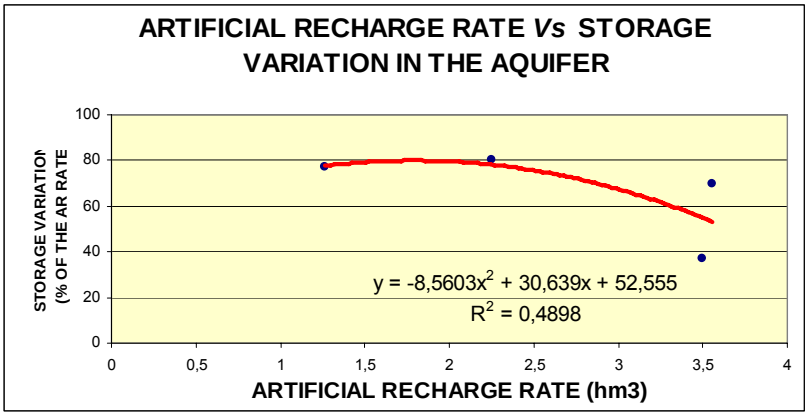


Figura 8-03. Relación entre los volúmenes para MAR tomados del río Voltoya y los incrementos en el almacenamiento del acuífero cuantificados mediante el método WTF (Water Table Fluctuation) para el cuatrienio inicial y para el Canal Este o "viejo".

Con los cálculos del caudal infiltrado durante el primer cuatrienio frente a los caudales medios de recarga, se ha realizado la gráfica adjunta. En porcentaje, el volumen infiltrado ha disminuido a lo largo del cuatrienio de operatividad "en solitario" del canal Este, como consecuencia, sobre todo, de la colmatación. El dato correspondiente al primer ciclo resulta anómalo por los ajustes en el canal hasta el trabajo "en óptimo". Los datos empleados son escasos, al haber variado sustancialmente el dispositivo tras la construcción y puesta en marcha del canal "Oeste", de mayor longitud y efectividad en 2005. Con ellos se ha deducido la ecuación de la curva polinomial interpolada:

$$y = -8.5603x2 + 30.639x + 52.555$$

El valor máximo obtenido al derivar la ecuación e igualarla a cero es 1,765, es decir, el porcentaje de infiltración más alto queda situado cerca del valor medio de los volúmenes de AR ensayados, que corresponde a caudales en torno a 150-200 l/s. Se

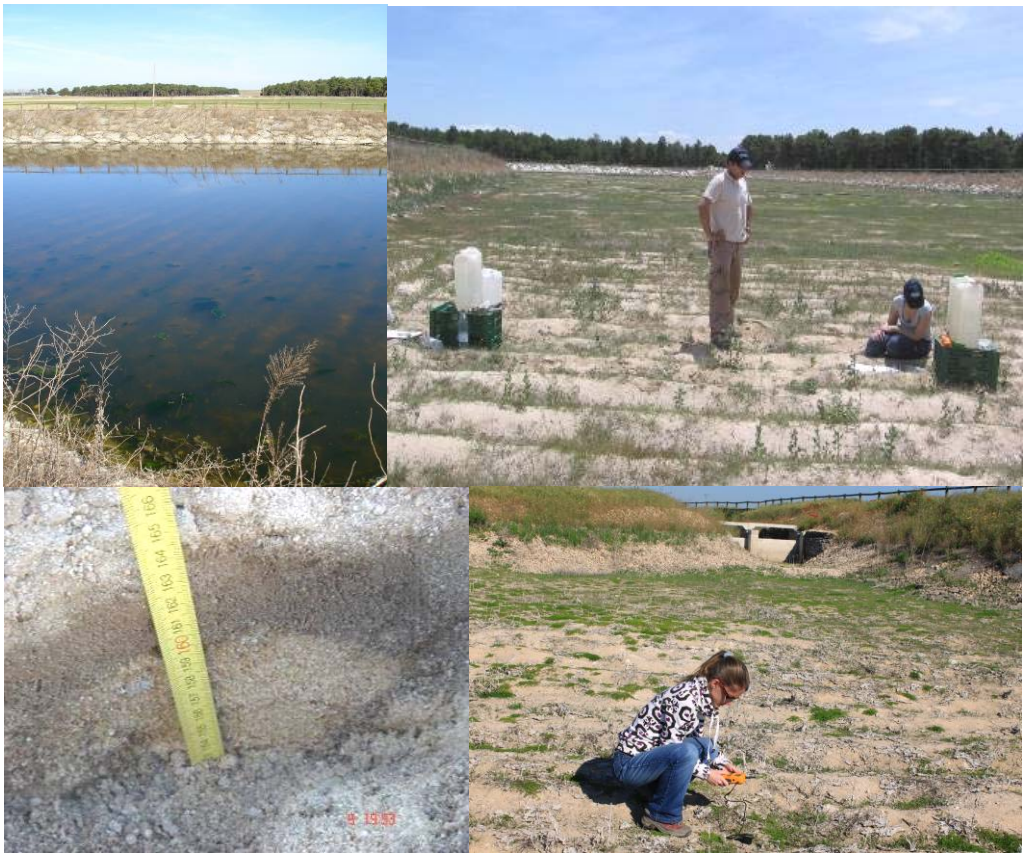
constata así que, a mayor caudal circulante, mayor volumen infiltrado; pero a caudales "bajos" existe un máximo que queda incluido en este intervalo.

Actuaciones en la morfología de las balsas de infiltración y canales

BALSAS DE INFILTRACIÓN

Para mejorar su efectividad se ha aumentando la superficie de contacto agua-medio receptor mediante el arado de caballones, que permiten además el depósito de finos en los surcos del fondo por gravedad, permaneciendo las crestas más elevadas relativamente limpias.

Con objeto de cuantificar las diferencias entre un fondo plano o arado, se realizaron en torno a 14 tests de infiltración en la balsa de decantación ubicada en la cabecera de ambos canales de Santiuste. Los primeros con fondo plano (septiembre de 2007). Poco después y con objeto de averiguar qué distancia entre los surcos es la más apropiada para obtener los valores más altos de infiltración, Se labraron caballones en la balsa de decantación inicial con una "longitud de onda" que oscila entre los 60 y 100 cm con arado romano. Los ensayos fueron repetidos en junio de 2008 y 2009, al término de cada ciclo de AR y tras secarse la balsa (tabla 8-02 y figuras 8-04 y 5).



Figuras 8-04 a) a d). Caballones arados con diferente anchura en el fondo de la balsa de decantación e infiltración; ensayo de permeabilidad mediante infiltrómetros de doble anillo en la zona convexa y concava superficial de los caballones, perfil de colmatación y estudio de los procesos colmatantes. Cabecera del dispositivo de la Cubeta de Santiuste (página anterior).

	Coordenadas UTM		Campañas de sept 2007/jun 08/jun 09		Características	
ESTACIÓN	**X**	**Y**	**Test (min)**	**TASA DE INFILTRACIÓN (mm/h)**	**Punto**	**Tipo de suelo**
BALSA 1	369832	4557443	100/255/101	2500/95/38	CX (MONTE) 0,6m	Arena
BALSA 2	369839	4557436	100/248/100	100/90/65	CV (VALLE) 0,6m	Arena arcillosa
BALSA 3	369821	4557448	148/120/68	90/**420**/100	CX: 0,8m	Arena
BALSA 4	369803	4557426	180/120/81	220/**232**/108	CV: 0,8m	Arena arcillosa
BALSA 5			150/150/nd	200/350/nd	CX: 1,0 m	Arena
BALSA 6			nd	250/220/44	CV: 1,0 m	Arena arcillosa

Tabla 8-03. Resultados de los ensayos de infiltración en la cabecera de la balsa de decantación. Valores para septiembre de 2007 (pre-operacional), junio de 2008 y junio de 2009 June (postoperacional) respectivamente.

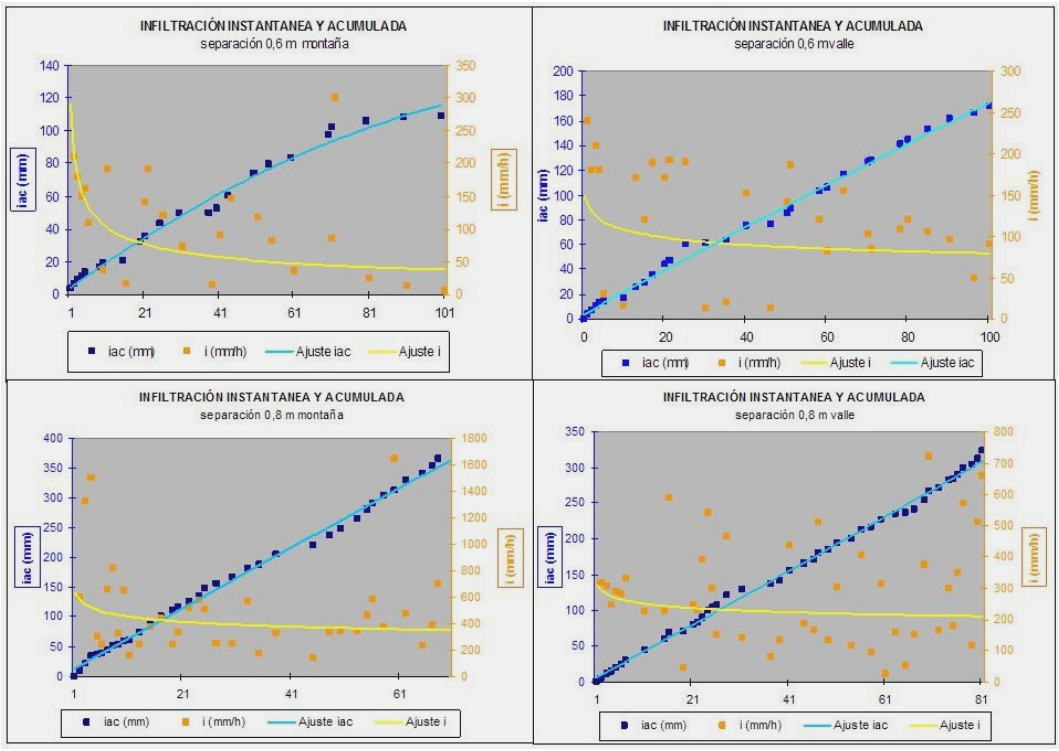
Para la distancia entre crestas menor (60 cm) y confrontando los resultados de junio de 2008 y 2009, los descensos en la tasa de infiltración sobrepasan la mitad en crestas y menos en los surcos.

Con 80 cm, las tasas aumentaron tras efectuar los caballones más de cuatro veces en la cresta y ligeramente por encima en el valle, con descensos mayores en crestas que en surcos. Un año después van de 90 y 220 mm/h (cresta/surco, respectivamente) a valores del orden de 420/232 mm/h.

Con 1 m de separación, los resultados son parecidos a los registrados en 2007 en las crestas, siendo bastante menores en los surcos.

Todos los resultados obtenidos permiten afirmar que, para el lugar y circunstancias de las pruebas, los caballones incrementan la tasa de infiltración con respecto a las balsas de fondo plano, con valores mayores en la cresta de los montículos que en el fondo de los surcos. Si bien no se puede establecer una tendencia definida, dado el escaso número de ensayos, se observa que los surcos espaciados 80 cm se comportan mejor en general. No obstante estos resultados no son concluyentes.

Como buena práctica, resulta recomendable la apertura de surcos mediante arado de discos, más respetuoso con el medio que el arado de vertedera.



Figuras 8-05 a) a d). Gráficas de interpretación del ensayo con infiltrómetro de doble anillo en la balsa 3, con longitud de onda entre surcos de 0,6 y 0,8 m, realizados en junio de los años 2007 a 2010. Gráficas de resultados e interpretación de 2008.

CANALES DE RECARGA ARTIFICIAL (AR)

Las principales líneas de acción para incrementar la tasa de infiltración y el volumen total infiltrado en el fondo y paredes de los canales se han centrado en la propia morfología del canal. De manera adicional en la regulación del caudal y en el filtraje de finos en el agua de AR.

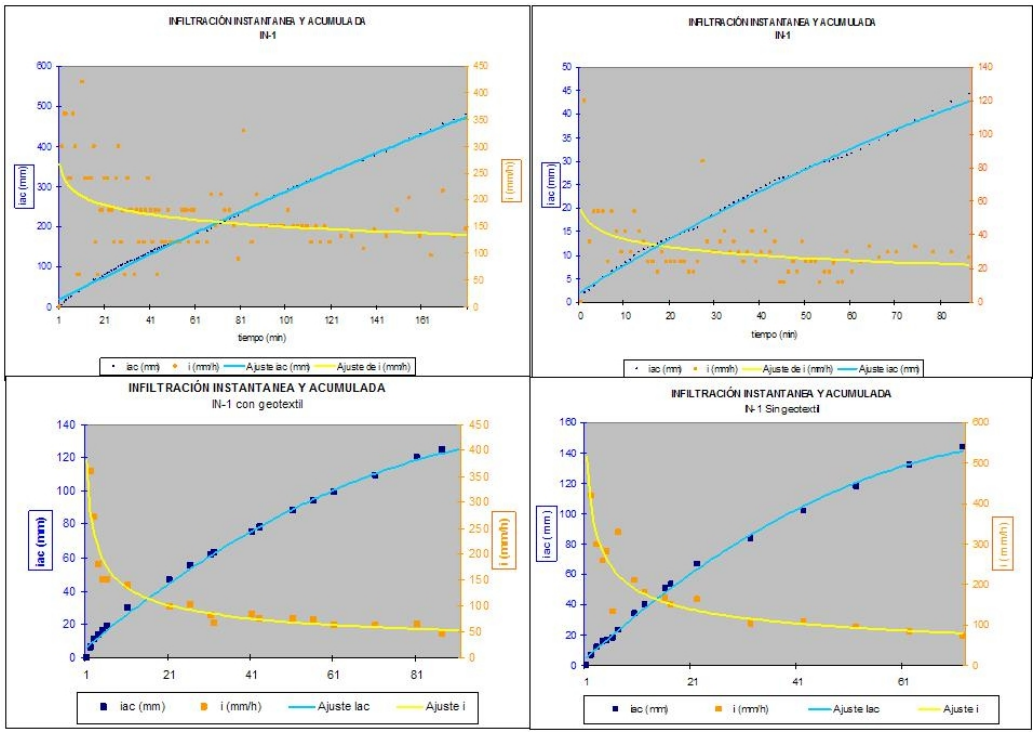
Desde 2008 se están ensayando dos tramos de canal con un caballón longitudinal equipados con un geotextil en cinco metros de longitud (figuras 8-06). La posición del tramo con mayor número de ensayos es a partir del punto UTM 369417/4559040. Con frecuencia anual se repiten los ensayos en el centro y en los extremos de este tramo (tabla 8-03 y figuras 8-06).

Figuras 8-06 a) y-b). Instalación de geotextiles en el fondo del canal de AR en la Cubeta de Santiuste en noviembre de 2008 y ensayos de infiltración siete meses después.

Entre las campañas de 2007 y 2008 se observó una drástica caída de la tasa de infiltración, que pudo ser debida a múltiples factores, como el exceso de sedimentos en el agua de recarga. No obstante, en el año 2009, las tasas fueron de nuevo ascendentes. En las zonas con geotextil se observó que se había producido una retención efectiva de finos, con la consiguiente reducción de la infiltración que causaban. En los puntos sin geotextiles, las tasas volvieron a valores de 2007.

	Coordenadas UTM		Campañas de sept 2007/jun 08/jun 09		Características	
ESTACIÓN EN EL CANAL	**X**	**Y**	**Test (min)**	**Tasa de infiltración (mm/h)**	**Punto**	**Tipo de suelo**
IV-1 GT-1i	369417	4559044	180/90/80	130/13/44	No geotextil	Arena
IV-1 GT-1f	369417	4559045	180/103/90	210/22/38	Sobre geotextil	Arcilla
IV-1 GT-2i	369714	4557572	120/86/na	90/108/na	Sobre geotextil	Arcilla
IV-1 GT-2f	369713	4557576	90/70/60	150/160/150	No geotextil	Arena

Tabla 8-03. Ensayos de infiltración sobre y cerca de los tramos de canal con instalación de geotextiles sintéticos. Valores para septiembre de 2007 (preoperacional), junio de 2008 y junio de 2009 (postoperacional) respectivamente. IV-1 GT 2 por efecto de una inundación por lluvia intensa.



Figuras 8-07 a) a d). Ensayos de infiltración en la estación IN-1 de Septiembre de 2007, Junio de 2008 y 2009. Gráficas de resultados de los ensayos de infiltración con infiltrómetro de doble anillo y su interpretación.

Analizando los resultados, se aprecia que la tasa suele ser más alta en ensayos de corta duración, si bien esta distancia se reduce en ensayos más largos, hecho que induce a pensar en la concentración de finos a cierta profundidad por debajo del canal. Además y aunque es conveniente incrementar el número de pruebas para obtener conclusiones fiables, la tendencia de la infiltración presenta una pendiente más alta en las últimas pruebas, donde la curva de infiltración (en tono claro) permite deducir que los sedimentos han avanzado en el perfil del suelo, acumulándose en horizontes de menor conductividad hidráulica, primero en las inmediaciones de la superficie y luego en la franja de 40 a 60 cm, resultados a tener en cuenta al planificar el mantenimiento.

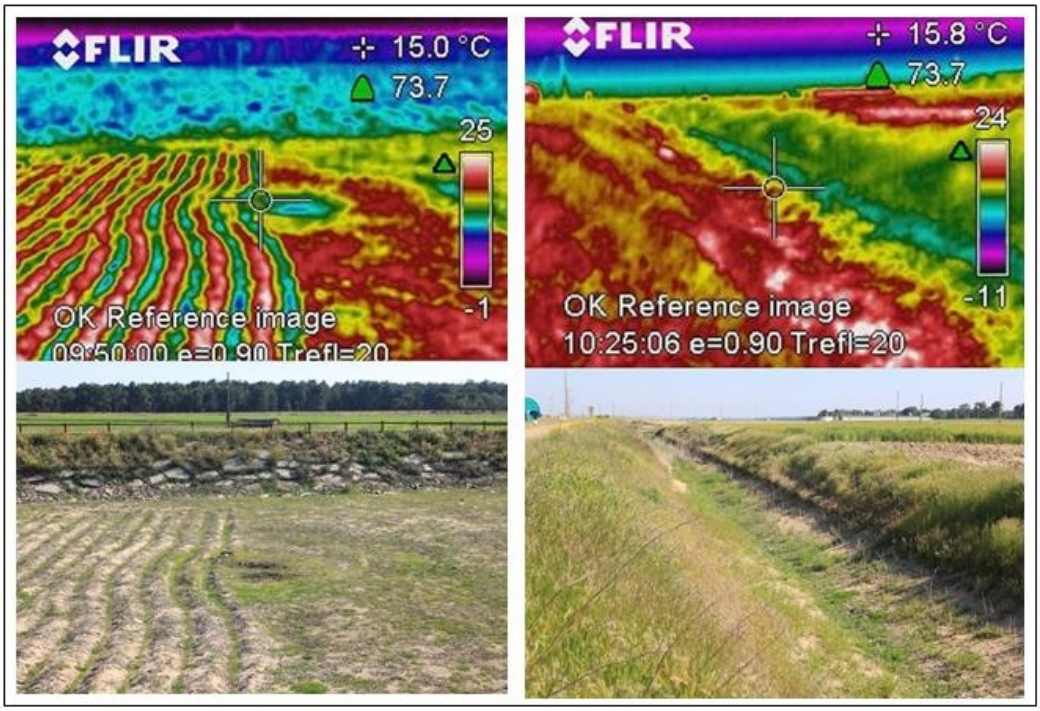
Estudios con cámara termográfica

Se trata de una línea de acción iniciada en mayo de 2010 que permite detectar, mediante la distribución de la temperatura en las balsas, canales y perfiles realizados en su fondo, zonas preferenciales de generación de colmatación.

En general las arenas eólicas son más claras que los procesos colmatantes, con fuerte carga de finos y, en general, tonalidad más oscura. Estos contrastes permiten corroborar las efectividad de los caballones, con mayor colmatación en surcos que en valles y diferencias cuantitativas a lo largo de los surcos. En la figura 8-08 a) se muestra

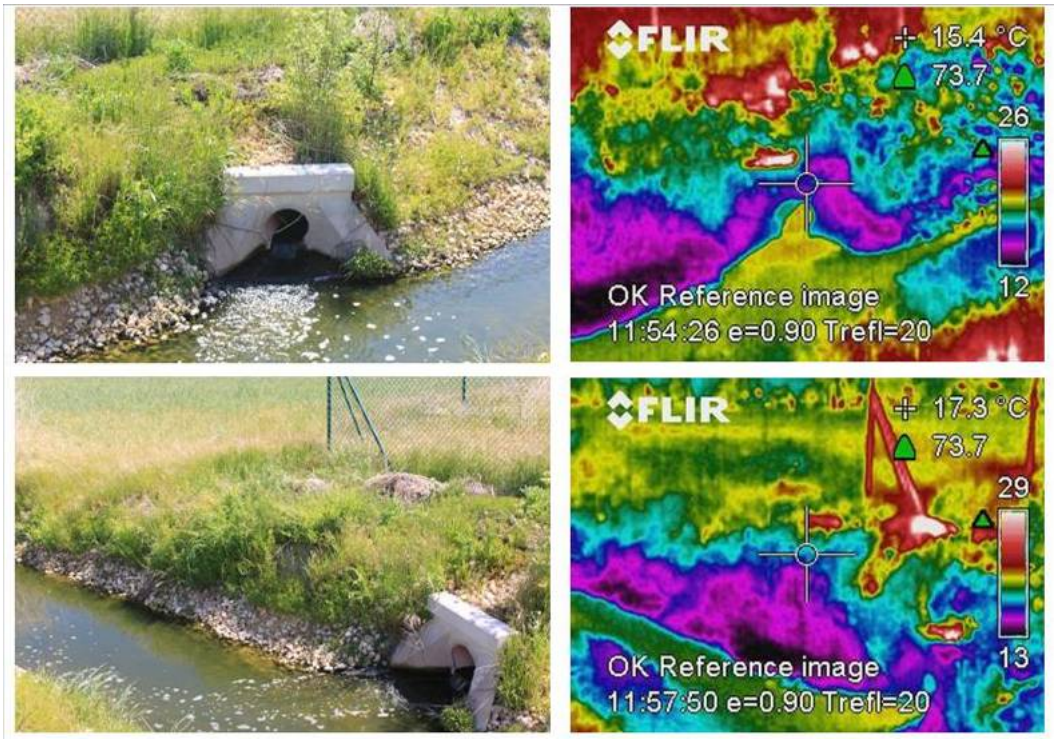
el aspecto de una balsa junto a su termografía. Las variaciones térmicas en los surcos se deben, bien a diferencias de altura, de vegetación, o a la aparición en superficie de procesos orgánicos y físicos, con tonalidad más oscura en general y mayor absorción de calor.

En las paredes de los canales se detectan tonalidades más oscuras hasta la cota del agua circulante. En el fondo se puede diferenciar, además, los tramos donde hay geotextiles enterrados, que dan tonos más fríos, de aquellos sin equipar, que concentran procesos colmatantes alrededor (figura 8-08 b).



Figuras 8-08 a) y b). Comparación entre los aspectos de una fotografía normal y una termografía, con objeto de detector procesos colmatantes.

En la figura 8-09 se han montado las fotografías de cara a estudiar los procesos de mezcla del vertido al canal desde la depuradora por lagunaje de Santiuste y el canal de recarga artificial. Ambas aguas presentan temperaturas diferentes y las tomas permiten apreciar el proceso de mezcla, la creación de contornos isotérmicos, islas de calor, etc., lo que resulta además indicativo de la velocidad de las aguas.



Figuras 8-09 a) y b). Comparación entre los aspectos de fotografías y termografías en la zona de mezcla del vertido desde la depuradora por lagunaje de Santiuste de San Juan Bautista al canal de recarga artificial.

Aunque esta técnica no está tan desarrollada como para hacer mediciones cuantitativas, presenta una gran validez en cualitativas, abriendo una interesante línea de acción, en permanente mejora. Se están tomando, además, termografías en distintos momentos del día, con objeto de ver la mejor hora para su detección.

CONCLUSIONES

La tendencia descendente de la tasa de infiltración en los canales y balsas del acuífero de Los Arenales se está reduciendo mediante la aplicación de técnicas de regulación del caudal y el pretratamiento (filtrado de finos y reducción del aire) en el agua de AR.

La regulación del caudal circulante permite reducir los finos y la entrada de aire al acuífero. Se aprecia que la recarga más efectiva se produce bien a caudales muy altos o bien a caudales circulantes del orden de 150 a 200 l/s. Caudales mayores disminuyen la tasa de infiltración por oxigenación del agua y por incrementar la concentración de partículas en suspensión. Los sistemas de vasos comunicantes bajo los dispositivos de parada y los tramos de canal enterrados provistos de tubería filtrante están dando buenos resultados.

En cuanto a las actuaciones en la morfología de las balsas y canales, los caballones en el fondo han incrementado la tasa de infiltración en todos los ensayos con respecto a los realizados en balsas de "fondo plano". La distancia entre las crestas que ha dado valores más altos ha sido en torno a 80 cm, con tasas cercanas al doble de las obtenidas con distancias 60 y 100 cm, si bien los datos obtenidos hasta la fecha no permiten que estos resultados constituyan una afirmación categórica. Los arados de discos aparentemente dan mejores resultados que los romanos con vertedera.

En las operaciones de mantenimiento hay que incidir especialmente en la limpieza de los surcos, tanto en los caballones de las balsas como en el caballón único longitudinal del centro del canal. Se ha planteado la instalación de geotextiles de baja permeabilidad y fácil reemplazo para extraer los finos. La experiencia realizada ha desprendido tasas de infiltración de 160 mm/h sin geotextil y 108 mm/h con él. La cuestión que suscita es si tan moderada diferencia en la tasa de infiltración compensa los costes de instalación y de extracción del geotextil "sucio".

Los análisis de las curvas de los ensayos de infiltración indican que existe una franja, situada entre 40-50 y 60 cm de profundidad, donde se han detectado descensos en la permeabilidad vertical (Kv), atribuibles, en general, a la colmatación por bajada de la temperatura y precipitados calcáreos. De este modo, el tratamiento mecánico durante las labores de conservación debería ser más penetrativo que el realizado hasta ahora (aumentando la franja removilizada y/o reemplazada desde 40 hasta 60 cm de profundidad).

Todos estos aspectos operativos, con ciertas limitaciones, podrían resultar extrapolables a escenarios análogos al acuífero de Los Arenales.

BIBLIOGRAFÍA

- Blaxejewski, M. (1979). "Gases in the ground and their effect during artificial recharge of groundwater" .Int. Symp. On Artificial Groundwater Recharge. Dortmund. Vol. IV, paper VI. 4. DVWK, Bull. 14. Verlag Paul Parey. Hamburg-Berlín. Pág. 59-70.
- Healy, R. y Cook, P. (2002). "Using groundwater levels to estimate recharge". Hydrogeology Journal Vol. 10, nº 1. Feb 2002. AIH-Springer.
- Fernández, E. y López, J. (2002). "Hydrogeological studies preceding artificial recharge of Los Arenales aquifer, Duero basin (Spain)". Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (Ed) Proceedings of the ISAR 4. Balkema Publishers-AIH. The Netherlands.
- Fernández, E. (2009). "Técnicas de tratamiento de suelo y acuífero (S.A.T.) aplicadas a la gestión de la recarga artificial". 2ª ed. Hidrogeología Hoy. Grafinat. http://www.hidrogeologia.es
- Fernández, E, García, J.M. y Minaya, M.J. (2009). "Propuestas para la detección y corrección de impactos producidos por procesos colmatantes en el dispositivo de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste (Segovia)". Boletín Geológico Minero, Vol. 120, nº 2. IGME.
- Krul, WF y Liefrinck, FA. (1946). "Recent groundwater investigations in the Netherlands". Monograph on the progress of research in Holland. Elsevier, New York, 78 Pág.
- Stuyfzand, P.J. (2002). "Quantifying the hydrogeochemical impact and sustainability of artificial recharge systems." Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (Ed) Proceedings of ISAR 4, Adelaide, SA, Sept. 2002. Balkema Publishers-AIH. The Netherlands.
- DINA-MAR, "Depth Investigation of New Areas for Managed Aquifer Recharge". Grupo Tragsa, Madrid, 05/2010, http://www.dina-mar.es.

ENSAYOS DE INFILTRACIÓN 2007-2010. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN. Por Óscar Martínez Tejero.

La mayor parte de los ensayos han sido llevados a cabo por Óscar Martínez con el apoyo de técnicos de la Gerencia de Arquitectura e Ingeniería de Tragsatec.

RESULTADOS

En el este apartado se pretende realizar una comparativa global para observar como ha evolucionado la infiltración en el dispositivo de recarga artificial, además de plantear una serie de conclusiones y recomendaciones.

Puesto que se trata de analizar la evolución de los principales puntos de ensayo, sólo se describen aquellos puntos en los que se haya realizado más de una evaluación.

A continuación se muestran los ensayos realizados durante los años 2007, 2008 y 2009 y 2010.

- ENSAYOS DE INFILTRACIÓN EN LA ESTACIÓN IN-1

En el año 2009 se recubrió la solera del canal con un geotextil en ese punto, de este modo se pudo comprobar el comportamiento del punto en ese año con geotextil y sin geotextil.

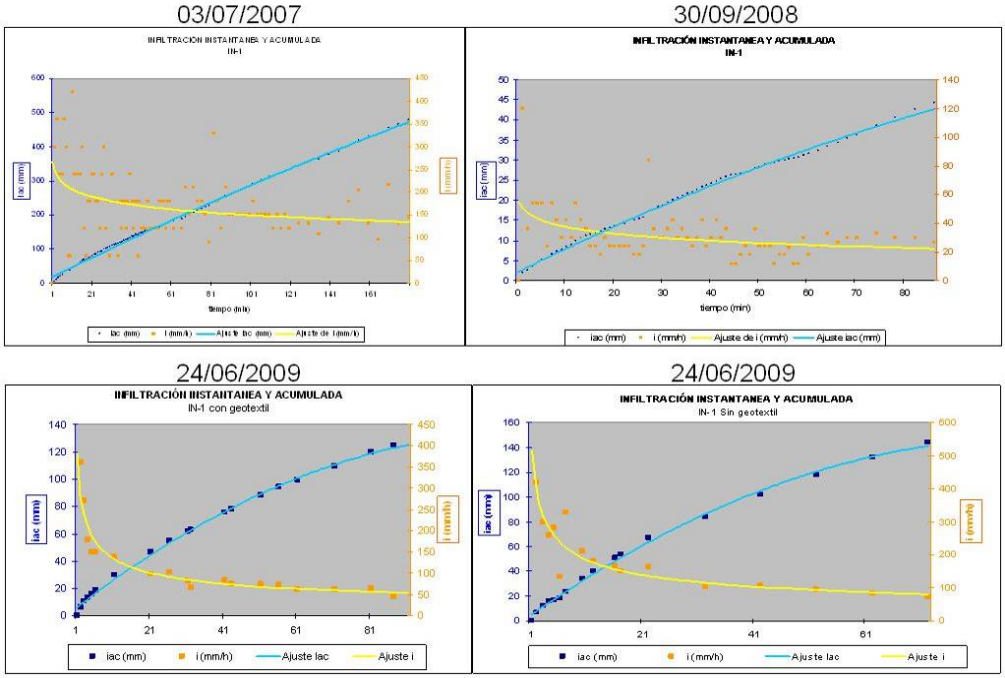


Figura 8-10. Curvas del punto de ensayo IN-1

Entre la campaña 2007 y 2008 se observó una drástica caída de la tasa de infiltración que pudo ser debida a múltiples factores, como el exceso de sedimentos en el agua de recarga. No obstante en el año 2009 volvieron a recuperarse las tasas. En las zonas con geotextil se observó que se había producido una retención efectiva de finos, con la consiguiente reducción de la infiltración que causaban. En las zonas sin geotextil los valores se volvieron a incrementar para aproximarse a los obtenidos en el año 2007.

En el año 2010, si bien se realizaron nuevas pruebas de infiltración, no pueden considerarse fiables puesto que las abundante precipitaciones causaron que los niveles freáticos estuvieran bastante superficiales, imposibilitando la valoración objetiva de la pruebas. A la vista de los resultados no se pueden obtener unas conclusiones fiables sin incrementar el número de pruebas.

En cualquier caso, lo que si puede observarse claramente es la gran pendiente que tiene, en las últimas pruebas, la curva de infiltración (en amarillo). Esto podría indicar que los sedimentos han avanzado en el perfil del suelo y se están acumulando en horizontes de menor conductividad hidráulica.

- ENSAYOS DE INFILTRACIÓN EN LA ESTACIÓN IN-11

En el punto IN-11 no se realizaron pruebas en el año 2009, por tanto no se puede constatar si continúa la evolución a la baja entre los años 2007 y 2008.

Figura 8-11. Fotografía del punto de ensayo IN-11.

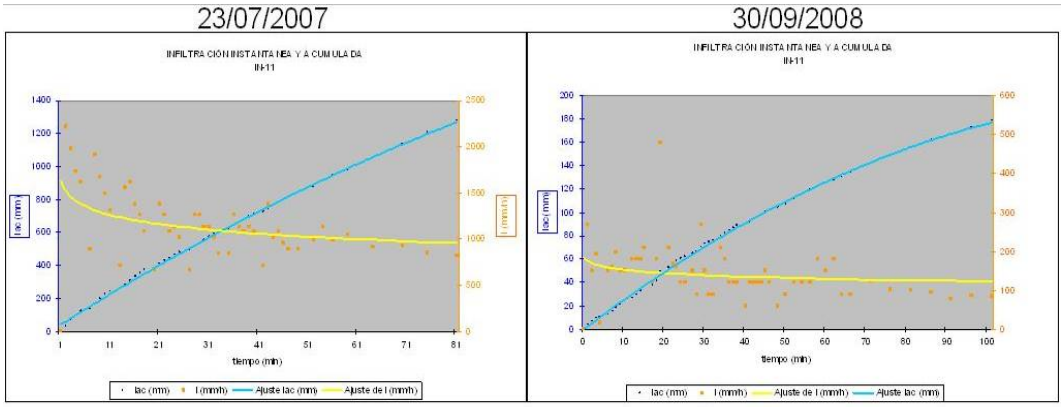


Figura 8-12. Curvas del punto de ensayo IN-11.

En el punto IN-11 no se realizaron pruebas en los años 2009 y 2010, por tanto no se puede constatar si continúa la evolución a la baja entre los años 2007 y 2008.

- ENSAYOS DE INFILTRACIÓN EN LA ESTACIÓN IV-5

Figura 8-13. Fotografías del punto de ensayo IV-5.

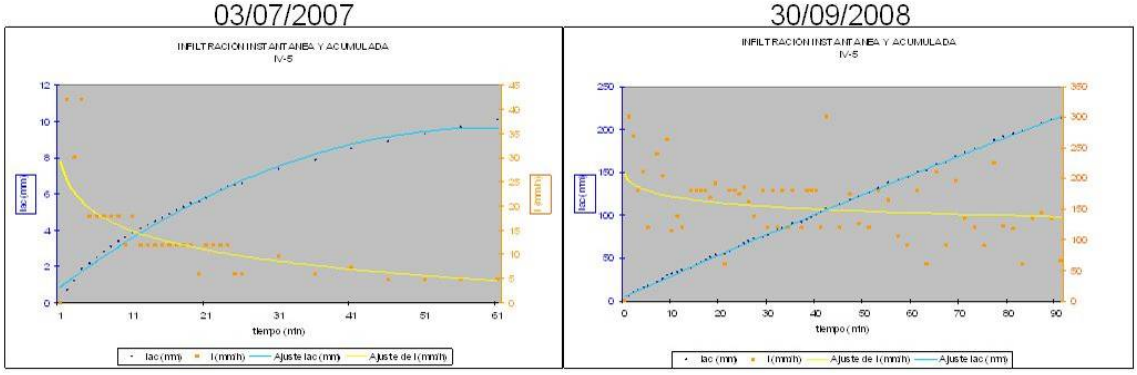


Figura 8-14. Curvas del punto de ensayo IV-5.

En este caso se observa una gran mejoría de la tasa de infiltración. A diferencia del año 2007, en el año 2008 se alcanza rápidamente la infiltración capilar con la estabilización de los valores. Podemos afirmar por tanto, que en este caso la evolución ha sido positiva.

En el año 2009 no se realizaron ensayos en este punto, por tanto no se tiene una muestra de valores suficientemente grande como para establecer una tendencia clara. Una diferencia tan grande de valores podría deberse a variaciones texturales de carácter puntual, puesto que aparentemente, no existe justificación alguna.

- ENSAYOS DE INFILTRACIÓN EN LA ESTACIÓN IN-0 BALSA ARENAS

Entre los años 2007 y 2008 se constató una drástica caída en las tasas de infiltración de la balsa.

Figura 8-15. Fotografía del punto de ensayo IN-0.

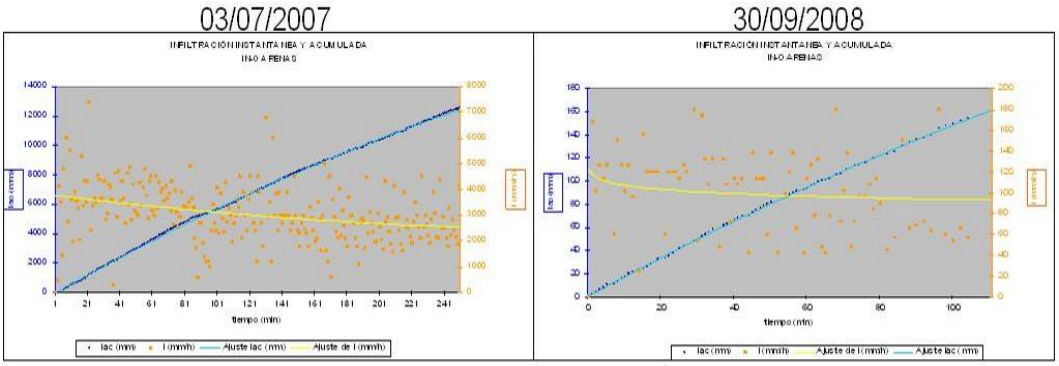


Figura 8-16. Curvas del punto de ensayo IN-0.

Era fácil observar que las depresiones estaban colmatadas de sedimentos. Por ello, y con objeto de valorar posibles soluciones se aplicó antes de la época de recarga un arado de vertedera en la zona de arenas. Las separaciones entre surcos eran de 60 u 80 cm. Posteriormente se realizó una prueba de infiltración tanto en la cresta del surco como en el valle.

Figura 8-17. Fotografía del punto de ensayo IN-0.

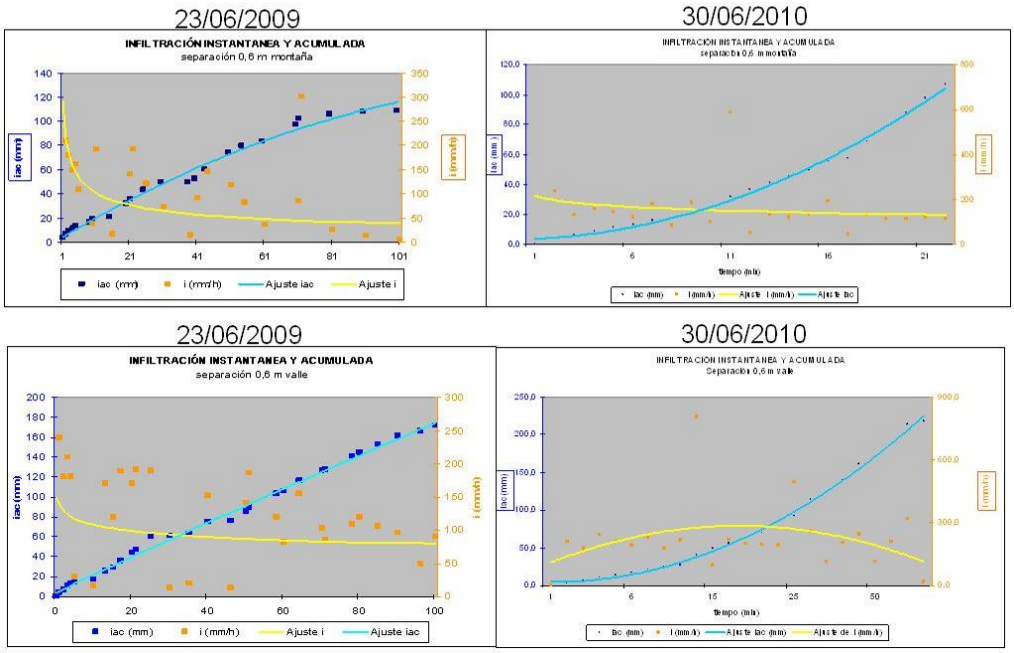


Figura 8-18. Curvas del punto de ensayo IN-0. Separación de 0,6 m en los surcos. Los gráficas superiores corresponden a ensayos realizados en crestas y las inferiores en valles.

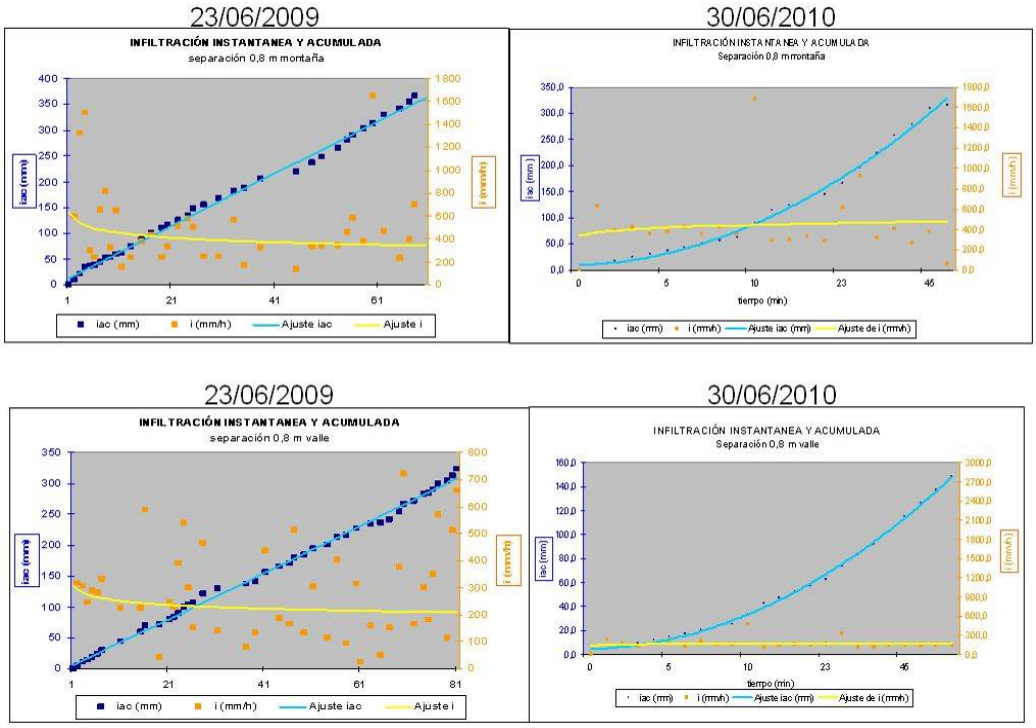


Figura 8-19. Curvas del punto de ensayo IN-0. Separación de 0,8 m en los surcos. Los gráficas superiores corresponden a ensayos realizados en crestas y las inferiores en valles.

Figura 8-20. Fotografía del punto de ensayo IN-0.

En las crestas de los surcos espaciados 0,6 m, se observa que se produjo una mejora de la infiltración capilar entre los años 2009/2010. Del mismo modo, para esa misma separación, la curva obtenida en los valles denota una cierta acumulación de finos en horizontes subsuperficiales.

En el caso de los surcos separados a 0,8m, se observa una mejora de la infiltración entre los años 2009 y 2010, si bien no se ha observado una variación sustancial en las pruebas del valle del surco.

Una vez observado el comportamiento del suelo durante dos años, podemos concluir que a priori el comportamiento general es mejor en los surcos espaciados 0,8 m que en los espaciados 0,6 m, puesto que en los primeros se producen mayores tasas de infiltración que además tienden a evolucionar al alza.

Figura 8-21. Fotografía de la zona de estudio.

INTERPRETACIÓN Y REVISIÓN

Si bien hasta el día de hoy el dispositivo de recarga artificial ha demostrado el cumplimiento de la misión para la que fue diseñado, también ha puesto de manifiesto los especiales cuidados y seguimiento que han de tenerse presentes en el futuro. Como recomendaciones y conclusiones podrían aportarse las siguientes:

- En primer lugar ha de planificarse anualmente un seguimiento de la tasa de infiltración en todos los puntos registrados. De este modo podrán plantearse medidas precisas en cuanto los problemas de colmatación empiecen a agravarse.
- Los resultados variables de unos años a otros pueden denotar que habría que realizar un seguimiento exhaustivo de la cantidad de sólidos en suspensión de

las aguas de recarga, para tratar de relacionar este parámetro con la variación de la infiltración.

- Se ha observado en algunos tramos de los canales el deficiente estado de conservación que presentan. El derrumbe de los taludes puede aportar a la solera de los canales una cantidad extra de sedimentos que podría incidir en el empeoramiento de los problemas de colmatación.
- El empleo de geotextiles, al igual que se ha demostrado en otros países, parece ser un método eficiente de control de sedimentos. Para su empleo se propone identificar las zonas con mayores problemas de colmatación para instalarlos durante periodos concretos del año y retirarlos posteriormente en ese mismo año.
- En la balsa deben realizarse más pruebas anualmente para observar la evolución de la tasa de infiltración. Si bien es interesante observar como afecta la separación entre surcos, habría que prestar atención a otro aspecto importante. Al abrir el surco mediante arado de vertedera debería tenerse en cuenta que la vertedera puede estar realizando mezcla entre horizontes así como cierta pulverización de la capa superficial. Esto aplicado a grandes superficies y a lo largo del tiempo podría ser sumamente contraproducente. Se propone por tanto realizar el mismo tipo de surcos mediante arado de discos, para reducir la mezcla entre horizontes así como la pulverización de los horizontes superficiales.
- Se plantea la posibilidad de seleccionar tramos piloto y estudiar como se comportan ante el tratamiento con sustancias floculantes, del mismo modo que habría que determinar el impacto de estos tratamientos al entorno y a la calidad del agua del acuífero.
- Se plantea realizar un seguimiento a los niveles de sodio del agua de recarga. En caso de presentarse valores elevados en algún momento, se planteará un plan adecuado de correcciones calizas.

Del mismo modo, se plantea la idoneidad de realizar los siguientes estudios.

- Estudio de la posible formación de un horizonte en el subsuelo, producido por el lixiviado de los materiales mas finos.
- Realización de labores de limpieza tanto de la costra superficial de arcillas como de la vegetación que se desarrolle en el caz y las balsas.
- Realización de un seguimiento de los perfiles del suelo para valorar los posibles cambios y evolución que se producen en los horizontes más superficiales.
- Análisis granulométrico de las superficies de infiltración de los dispositivos, cuyos resultados permitan establecer una relación entre la tasa de infiltración y granulometría del suelo.

BIBLIOGRAFÍA

- TRAGSATEC. (2006-2007) “La recarga artificial de acuíferos como práctica alternativa de gestión hídrica. Determinación de zonas susceptibles de aplicar esta técnica en el ámbito nacional. CP 00/13.223. Fase de definición. Abril de 2006 a Octubre de 2007”. Documento interno no publicado.
- DINA-MAR. (2007). “Proyecto para la gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible. CP 30/13.053. Fase de desarrollo tecnológico. Segundo semestre de 2007. Grupo Tragsa”. Documento interno no publicado.
- DINA-MAR. Depth Investigation of New Areas for Managed Aquifer Recharge. (2008). “Memoria del proyecto de i+D+i. DINA-MAR. Proyecto para la gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible. CP 30/13.053. Fase de desarrollo tecnológico. Anualidad 2008”. Documento interno no publicado.
- DINA-MAR. Depth Investigation of New Areas for Managed Aquifer Recharge. (2009-2010). “Memoria del proyecto de i+D+i. DINA-MAR. Proyecto para la gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible. CP 30/13.053. Fase de desarrollo tecnológico. Memoria fiscal del proyecto. Anualidad 2009. Marzo de 2010.” Documento interno no publicado.

CAPÍTULO 9. DIFUSIÓN, TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA Y EDUCACIÓN AMBIENTAL

CRITERIOS DE DIFUSIÓN, TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA Y EDUCACIÓN AMBIENTAL APLICADOS A LA HIDROGEOLOGÍA, Y, ESPECIALMENTE, A LA GESTIÓN DE LA RECARGA. ALGUNOS EJEMPLOS PARA ESPAÑA. Por Enrique Fernández Escalante, Manuel López Hernández y Rosa Cordero Sánchez.

Este capítulo ha sido redactado por Enrique Fernández Escalante y Manuel López Hernández, con la colaboración externa de la bióloga Rosa Cordero Sánchez, de Método Gráfico Exposiciones.

RESUMEN

Uno de los hitos INICIALES del proyecto de I+D+i DINA-MAR es el diseño de un plan de divulgación y educación ambiental. Desde un principio este plan ha contemplado varias propuestas de estrategias de información, formación y divulgación, dirigidas a distintos sectores de la población agrupados en grupos homogéneos. El desarrollo del plan de divulgación ha desvelado que la combinación de técnicas de transferencia de tecnología con técnicas de educación ambiental tiene un efecto sinérgico de cara a la diseminación de conocimientos y la implantación de la técnica de la recarga artificial de acuíferos en países con un grado de implantación escaso o incipiente, como puede ser España.

Como resultado del desarrollo de materiales y procesos divulgativos durante estos cuatro años, se ha elaborado una estrategia embrionaria, que desemboca en un catálogo de tipo matricial que relaciona actividades con grupos diana. Esta matriz permite abordar con cierta planificación el proceso centrífugo de la transferencia de tecnología, incorporando criterios técnicos a la transmisión de la filosofía de la divulgación, como un proceso centrífugo desde los grupos de desarrollo hacia los grupos homogéneos, desde gestores y autoridades hasta la población en general, acotando los círculos de difusión, definiendo las direcciones estratégicas y estableciendo etapas que dan una cronología al proceso.

INTRODUCCIÓN

La gestión de la recarga de acuíferos, antes recarga artificial (en adelante AR o MAR) en España es considerada, hasta la fecha, una técnica “especial” y desconocida por gran parte de la población española, más familiarizada con la desalación, el reciclaje y los trasvases intercuencas como principales alternativas de gestión hídrica. Para que la gestión de la recarga de acuíferos pueda ser empleada en todo su potencial, debe ser conocida por todos los sectores implicados e interesados, es decir, por toda la población.

La intención de este artículo se apoya en el principio 19 de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano (Estocolmo, 1972), que habla de la necesidad de la educación en cuestiones ambientales, dirigida tanto a las generaciones jóvenes como a los adultos, que preste la debida atención a todos los sectores de la población en el sentido de su responsabilidad en cuanto a la protección y mejora del medio.

Para ello es preciso llevar a cabo campañas de Difusión y Transferencia de Tecnología (en adelante DyTT), que adquieren su máxima efectividad al combinarlas con técnicas de educación ambiental, entendida como "filosofía de la divulgación". Recopilando la metodología y forma de actuar de todas ellas, se han diseñado y practicado técnicas concretas para divulgar la gestión de la recarga artificial. Estas consisten en propuestas de estrategias de información, formación y divulgación, dirigidas a distintos sectores de la población, agrupados en sectores homogéneos, dentro del marco del desarrollo sostenible.

OBJETIVOS

Las pretensiones de este artículo son:

- Fomentar la técnica *Managed Aquifer Recharge* (MAR) como una sólida alternativa a técnicas de gestión hídrica más tradicionales y con mayor grado de implantación.

- Avanzar en el camino para iniciar nuevas líneas de investigación del binomio MAR-DyTT.

- Estudiar y presentar ciertos criterios de educación ambiental, sensibilización y divulgación relacionados con la AR de carácter práctico, especialmente aplicables a países en vías de desarrollo o con escaso grado de implantación de estas técnicas.

- Proponer una serie de actuaciones para acercar esta alternativa de gestión hídrica a universidades, institutos, colegios y a la población en general.

MÉTODOS

El planteamiento metodológico consta de varias etapas que se describen a continuación.

Primeramente se presentan y asumen las premisas y objetivos generales de la divulgación y de la educación ambiental para, posteriormente, intentar integrarlos en esquemas de gestión hídrica.

Establecimiento de grupos de destinatarios y estrategias de información, formación o divulgación que permitan elevar el grado de conocimiento general sobre la técnica MAR.

Establecer una base para la posterior elaboración de proyectos que permitan acercar la técnica MAR y su alcance a la población, bien sea como educación formal, como educación ambiental o como mera divulgación.

ESTADO DEL ARTE

España se puede considerar el país con mayor déficit hídrico de toda la Unión Europea. De hecho, el sureste peninsular es la única zona desértica propiamente dicha de todo el continente. En algunos puntos, en los que el clima se puede considerar árido o semiárido, las precipitaciones no superan los 250 mm anuales y la temperatura media anual es superior a 17ºC.

Desde el punto de vista de la economía del bienestar y del progreso, tan en boga en nuestros días, el agua se ha convertido en uno de los factores determinantes del desarrollo de la sociedad actual, y se intuye un crecimiento exponencial en el consumo de agua, en proporción directa con el aumento de la población humana, segundas residencias, ocio y turismo, transformación de los cultivos de secano en regadío, etc.

Todo ello conlleva una necesidad creciente de agua, siendo éste un recurso escaso y limitado, lo que conduce, sin duda, a enfrentamientos y situaciones conflictivas de muy difícil solución.

La mayor parte de las propuestas incluidas en los últimos planes hidrológicos españoles van enfocadas principalmente a la construcción de nuevos embalses en superficie y al trasvase entre cuencas. La primera opción conlleva la pérdida de suelo fértil y un gasto elevado en infraestructura y obra civil. En el caso de la segunda, y tal como se ha podido comprobar a lo largo del año 2003, provoca graves enfrentamientos territoriales.

Ante esta situación, la recarga artificial de acuíferos se presenta, por tanto, como una medida que ayudaría a resolver o paliar, en la medida que se vaya avanzando en su investigación, estos conflictos. Cabe preguntarse, por tanto, qué motivos o causas determinan la poca aplicación de esta técnica en España. Entre las posibles respuestas cabe destacar el desconocimiento generalizado que existe de la técnica MAR y la poca difusión de las experiencias realizadas hasta la fecha.

La divulgación, combinada con la educación ambiental, se presentan como una herramienta valiosa para conseguir un mayor grado de información y conocimiento, así como una estrategia para construir una sociedad formada por personas con los conocimientos y actitudes necesarios para adoptar posiciones críticas y participativas respecto a la conservación de los recursos naturales y a la calidad de vida.

DISCUSIÓN

Aspectos Generales de la Educación Ambiental y de la divulgación y estrategias aplicadas a la Gestión de la Recarga Artificial (MAR)

Según la definición de la UICN (1970), la educación ambiental es un proceso que consiste en reconocer valores y aclarar conceptos con el objeto de fomentar destrezas y aptitudes necesarias para comprender las interrelaciones entre el hombre, su cultura y su medio biofísico.

Su finalidad principal consiste en que el grupo social o el individuo, partiendo del conocimiento de su realidad inmediata, consiga unos cambios de conciencia, de actitudes y conductas que, mediante un método de análisis crítico, fomente su propia responsabilidad y participación en la solución de los problemas ambientales en cooperación con los demás.

Estos cambios implican compartir la responsabilidad a escala nacional, regional, local y personal, lo que se ha dado por llamar la "responsabilidad compartida" entre los poderes públicos, empresas públicas y privadas y los ciudadanos.

Todas las actuaciones educativas deben tener en cuenta el "principio o enfoque precautorio", para evitar la aparición de problemas mediante una atención específica sobre los agentes y las actividades que perjudican el recurso agua y agotan sus reservas, poniendo en peligro su sostenibilidad al rebasar los límites de su recuperación natural o inducida. Por tanto, la reutilización, el reciclaje y el ahorro son actuaciones fundamentales para evitar el despilfarro y la merma del recurso agua, y deben ser los principales puntos a tener en cuenta en cualquier campaña de educación ambiental, junto con la presentación de "nuevas tecnologías" y mejoras técnicas.

Estas dos premisas de responsabilidad compartida y enfoque precautorio, aparentemente sencillas, conllevan no pocas dificultades y complejidades. No es posible llevar a cabo ninguna de las dos sin que se produzca una mayor formación de profesionales y gestores; una mayor y mejor información dirigida a los ciudadanos y, especialmente, a los empresarios. Algunos de los medios para conseguir tal fin son la divulgación de manuales de buenas prácticas; y la puesta en marcha de mecanismos de participación pública efectiva, a través de la cual se consiga, de una forma real, la corresponsabilidad de todos.

De acuerdo con Argadon, 2003, la educación ambiental se diferencia de la divulgación en que esta consiste en difundir resultados de investigaciones empleando diversos canales, pero el núcleo emisor no tiene garantía alguna de que el receptor ha aprendido estos conocimientos. En cambio la transferencia de tecnología se produce si las estrategias de difusión han llegado a los grupos diana, y estos han asimilado los conocimientos hasta el punto de ser capaces de aplicarlos.

El proceso de transferencia de tecnología queda bien representado en el ideograma de Kiwiatt, (en González *et al*, 2006).

El aspecto más destacable del diagrama es la difusión como un proceso centrifugo, desde el centro (grupos de desarrollo) hacia el borde (círculos de difusión).

Este Plan de Acción combina la información general y la particular con estrategias derivadas, conforme al siguiente ideograma, basado en Tapp, 2002 (figura 9-02).

Figura 9-01. Diagrama de Kiwiatt, indicador de la alta complejidad de cualquier proyecto de transferencia de tecnología.

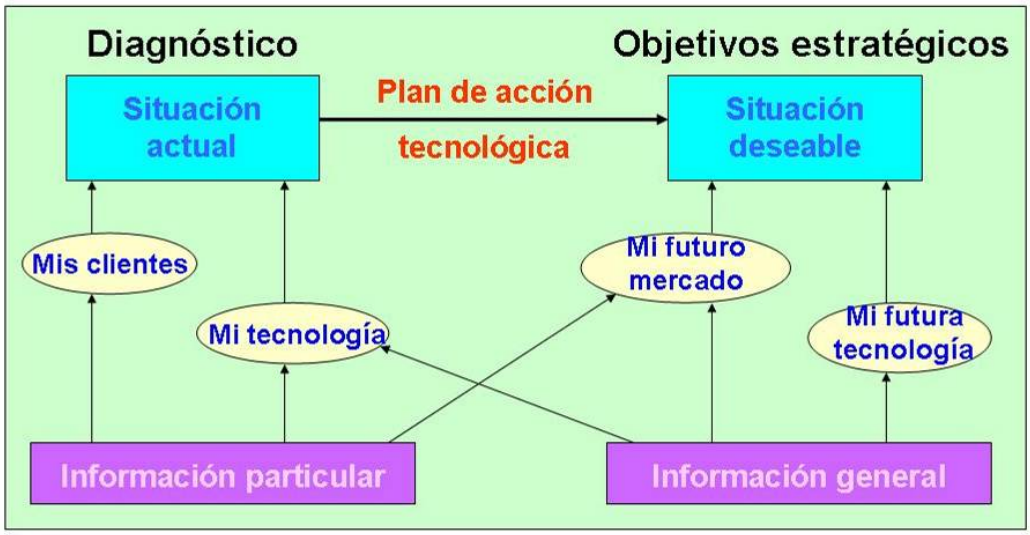


Figura 9-02. Ideograma de un Plan de Acción que combina la información general y particular (diagnóstico) con las estrategias planificadas (objetivos estratégicos), (modificado de Tapp, 2002).

Este ideograma combina el diagnóstico de la información particular actual, la propia tecnología y sus receptores con la situación deseable, basada en información general y en la correcta aplicación del Plan de Acción Tecnológico (PAT), que permite intuir qué actividades han tenido mayor impacto en la consecución de los objetivos estratégicos. Otras etapas incluidas en el Plan son el diagnóstico tecnológico (que cuenta con una compleja metodología para su evaluación),

La gestión de los recursos tecnológicos identifica siete tecnologías diferentes conforme al grado de absorción de los conocimientos que se pretenden divulgar en los destinatarios y conforme a la importancia relativa de la tecnología a difundir. Esta idea es sintetizada en el siguiente mapa (figura 9-03).

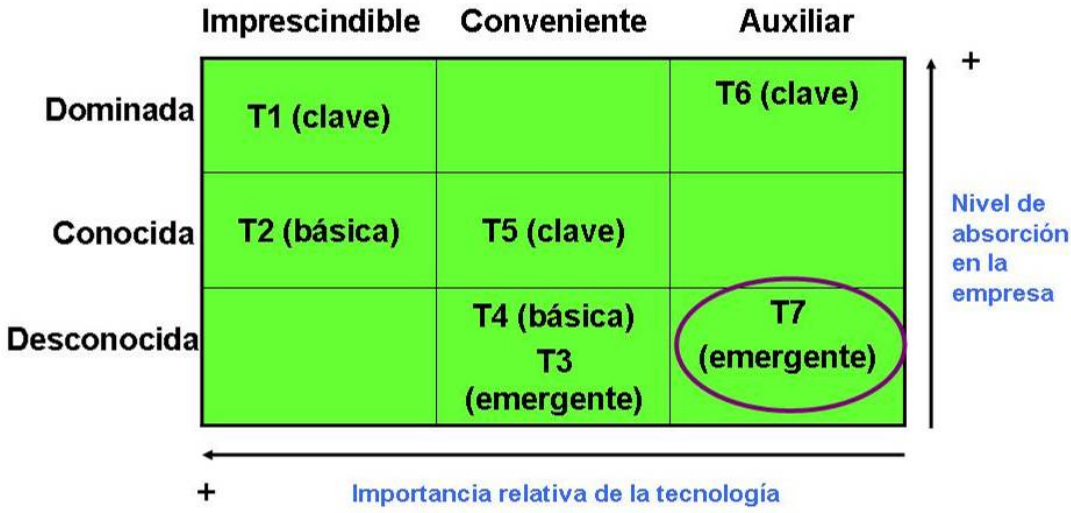


Figura 9-03. Mapa ilustrativo de la gestión de los recursos tecnológicos enfocado a grupos Diana y diferenciando siete tecnologías diferentes (modificado de Tapp, 2002).

Conforme a este mapa, la gestión de la recarga, e incluso la hidrogeología, pueden ser clasificadas como técnicas emergentes o T7.

Estos argumentos resultan indicativos de la complejidad del proceso de implantación de una ciencia, disciplina o tecnología, y han sido incorporados a la estrategia divulgativa en su base, compartiendo la filosofía del proceso.

El estado del arte, a nivel genérico, se encuentra bien desarrollado en el Plan Nacional de I+D+i 2008-2011 del Ministerio de Ciencia e Innovación.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Las actuaciones educativas relativas a la técnica MAR deben cubrir el objetivo general de la educación ambiental de “implicar a toda la sociedad”: alcanzar a todos los sectores de la población, pero especialmente a aquellos en quienes recae la toma de decisiones o ejercen mayor influencia social y tienen, por tanto, mayor responsabilidad: administraciones, legisladores, empresas, educadores, medios de comunicación, etc.

- Promocionar la formación específica en AR a los colectivos profesionales especializados en la temática de hidrogeología y, por supuesto, responsables y gestores de la Administración Pública.

- Difundir la técnica MAR aportando información y resultados de las experiencias llevadas a cabo en España y otros países que llevan aplicando esta técnica desde hace varias décadas, p.e. Holanda, Alemania, Australia y USA.

- Crear y mantener herramientas de información versátil, de fácil acceso y manejo, y de fácil actualización. A este respecto, Internet se configura como el medio más apropiado hoy en día.

- Crear y mantener herramientas de participación activa por parte de los beneficiarios directos y de la población en general.

DESTINATARIOS

Todas las actuaciones de educación ambiental deben ser dirigidas a la totalidad de la sociedad, si bien, no se puede difundir el mismo mensaje, ni el mismo nivel de conocimientos de forma generalizada e indiscriminada. Por tanto, deben establecerse grupos homogéneos a los que transmitir el mismo mensaje: contenidos, lenguaje y metodología deben ser los adecuados a cada grupo social, no solo por el nivel de conocimientos del grupo destinatario, sino también atendiendo a su grado de responsabilidad.

Por ello, proponemos dos posibles clasificaciones de destinatarios: por un lado, atendiendo a su grado de conocimiento, y, por otro, atendiendo a su grado de responsabilidad y rol social, con especial énfasis en los responsables técnicos de la gestión de los recursos hídricos.

Según el grado de responsabilidad y rol social:

- Personas con capacidad para resolver el problema: políticos, planificadores, técnicos, etc.
- Personas involucradas en el problema: agricultores, industrias, etc.
- Personas que padecen el problema de las sequías: todos.

Según el grado de conocimiento:

- Especialistas.
- Población en general.
- Estudiantes.

Todas las estrategias para conseguir el objetivo previsto deben ir claramente dirigidas a estos grupos definidos de destinatarios.

RESULTADOS. PROPUESTA DE UNA ESTRATEGIA DE DyTT

Las propuestas siguientes han sido diseñadas conforme a criterios de ingeniería ambiental, de aceptación general en la bibliografía consultada.

Propuesta de una fórmula aplicada

Conforme a lo expuesto en los párrafos precedentes, resulta lógico pensar que algunas estrategias de educación ambiental, divulgación y transferencia de tecnología, dirigidas a distintos sectores de la población de manera "personalizada", pueden incrementar el grado de conocimiento y de sensibilización con respecto a la hidrogeología, y más concretamente, con respecto a la gestión de la recarga.

Conforme a estas premisas y en este marco de trabajo, se propone la fórmula que hemos designado "DET" o "*fórmula del detective*", cuya expresión es:

$$K = D \cdot E^2 \cdot T^3$$

Donde:
K = "*Key element*" o el Kit de la cuestión
D= Divulgación (Dissemination)
E^2= Educación Ambiental (Environmental Education)
T^3= Técnicas de Transferencia de Tecnología *(Technology Transference Techniques)*

Es decir, el Kit de la cuestión resulta de combinar la divulgación (D), con la Educación Ambiental (E^2) y las Técnicas de Transferencia de Tecnología (T^3).

Los términos de la fórmula corresponden a los acrónimos de estas técnicas, que separadamente tienen un efecto positivo, pero combinadas, se potencian entre sí, generando un sinergismo de mucha mayor efectividad que la aplicación de técnicas aisladas, de ahí los exponentes de las fórmulas.

Esta afirmación no es gratuita y será demostrada en los apartados posteriores en casos concretos y mediante la aplicación de "indicadores de consecución del objetivo", que no es otro que dar a conocer la hidrogeología a la población y la elevada efectividad de la técnica MAR.

Propuesta de una estrategia centrífuga y centrípeta

Conforme al objetivo planteado relativo a proponer una estrategia integral enfocada a trasladar los conocimientos emanados del proyecto de I+D+I a la población en general, se propone el siguiente planteamiento:

El centro de cada círculo de difusión debe cumplir, al menos, las siguientes premisas:

- Recopilar grupos de acción enriquecidos con los resultados de experiencias propias a nivel regional.
- Buen conocimiento del estado del arte y de su evolución a nivel internacional, mediante la aplicación de técnicas de vigilancia tecnológica.

- La transferencia de tecnología, formación y difusión deben recibir un alto grado de atención en los proyectos.

La estrategia incorpora los siguientes paradigmas:

- Considerar la difusión como un proceso centrífugo desde los grupos de desarrollo a través de círculos de difusión.
- El empleo de técnicas de transferencia de tecnología, tales como la diagnosis y la gestión de recursos tecnológicos.
- Preparar una lista de materiales y actividades “personalizada” para los distintos grupos Diana.
- Permitir que el proceso propuesto sea abierto y adaptable para cada país, de acuerdo con su cultura e idiosincrasia. Esto es viable permitiendo el uso de ficheros editables y accesibles por Internet, facilitando su empleo mediante figuras blandas de protección intelectual, etc.

Las técnicas psicosociales están incorporadas en la diseminación de forma inherente e indisociable, si bien, dada la alta complejidad de esta temática, no son consideras en este artículo más que de forma colateral.

El proceso de transferencia es centrífugo o *spin-out*, que parte de un grupo generador, constituido por educadores, divulgadores, investigadores y estrategas. Este grupo genera actividades y materiales de DyTT enfocados a los seis grupos destinatarios.

El proceso concluye mediante opciones de seguimiento (indicadores de impacto y consecución del objetivo) y un proceso centrípeto (retroalimentación o feedback), mediante técnicas de vigilancia tecnológica de la evolución del proceso, producto o servicio; o bien aportaciones directas de grupos en conexión directa con el centro de difusión, incluso con participación directa (asociaciones ecologistas, ONGs, comunidades de regantes, etc.).

El proceso de DyTT es sintetizado en el ideograma siguiente (figura 9-04):

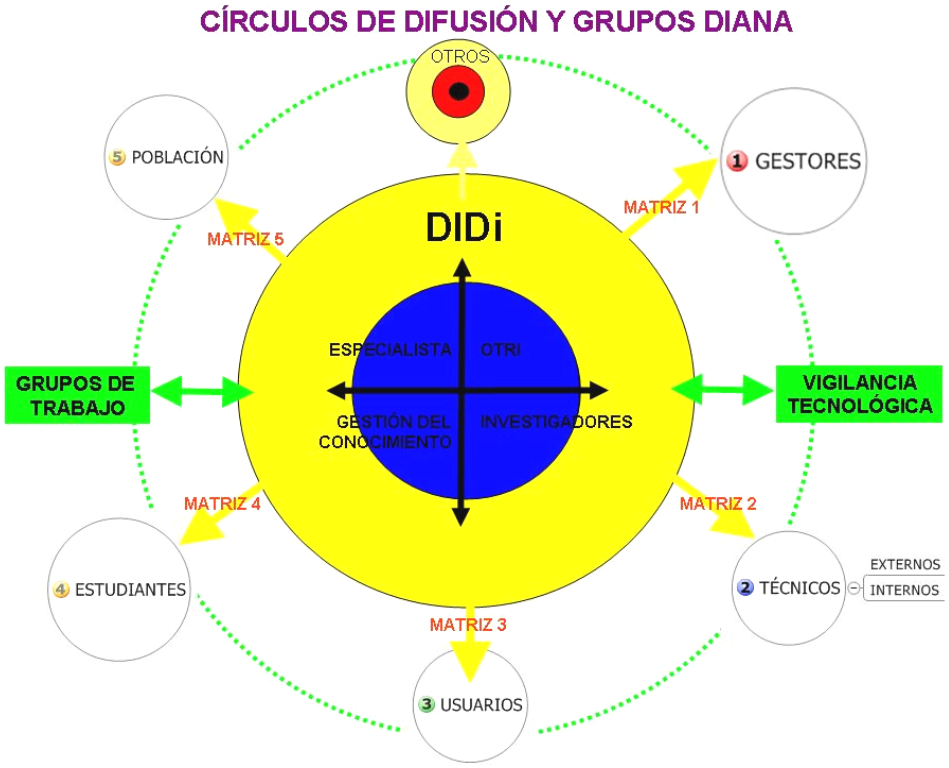


Figura 9-04. Ideograma propuesto para la estrategia de DyTT, con mención de los círculos de difusión y grupos diana (modificado de Fdez. Escalante, 2009).

La matriz (master) diferencia unos grupos de desarrollo, como organismos generadores del conocimiento y tecnología a transferir, y unos destinatarios concretos agrupados en grupos diana. El proceso es centrífugo y agrupa técnicas de divulgación y transferencia de tecnología con técnicas de educación ambiental y psicosociales, para la difusión centrífuga de los resultados de investigación, a través de unas direcciones estratégicas definidas, conforme al impacto que, previsiblemente, puede tener cada actuación en cada Grupo Diana.

Cabe destacar que el proceso debe ser planificado desde el inicio de cada proyecto y debe reservarse una partida económica posterior al cierre de la actividad investigadora, de una duración entre seis meses y dos años, con objeto de difundir y "colocar" el producto.

El proceso planificado debe ser flexible, ya que hay cambios en el mercado que debería detectar el grupo encargado de la Vigilancia Tecnológica.

Además de difundir los materiales/actividades, el proceso es bidireccional, retornando a los grupos generadores un feedback a través de Grupos de Trabajo y de técnicas de vigilancia tecnológica, incluyendo indicadores. Esta retroalimentación permitirá evaluar el grado de implantación del producto/proceso/servicio y evaluar el impacto de las actividades/materiales seleccionados.

Propuesta de una matriz operativa

La matriz operativa es el resultado de cuatro años de DyTT y la cuantificación del impacto de las actividades llevadas a cabo en este período.

Esta matriz permite planificar el proceso centrífugo de DyTT con cierto compromiso, desde grupos generadores de conocimiento a grupos receptores homogéneos (desde autoridades al público en general), definiendo círculos de difusión, las direcciones para lograr los objetivos estratégicos y su impacto o efectividad. También se considera cómo obtener una retroalimentación y horizontes temporales para dotar al proceso de una cronología. El proceso queda así:

GRUPOS DE DESARROLLO > ACTIVIDADES/MATERIALES > GRUPOS DESTINATARIOS >FEEDBACK

Conforme a esta matriz (que puede ser empleada como listado de chequeo) y con objeto de simplificar, en un caso se han diferenciado cinco grupos Diana, añadiendo un sexto grupo llamado “otros” que engloba todos los no contemplados (eje X de la matriz o listado de chequeo). Los grupos propuestos aparecen en la figura 9-05.

1- POLÍTICOS Y GESTORES
2- GRUPOS ESPECIALISTAS (TÉCNICOS, CONSULTORES)
3- GRUPOS INVOLUCRADOS Y AFECTADOS
4- GRUPOS ESCOLARES
5- POBLACIÓN EN GENERAL
6- OTROS

Figura 9-05. Grupos Diana receptores del proceso sinérgico de combinar estrategias de DyTT y de educación ambiental.

Por otro lado, se propone un catálogo de actividades y/o materiales, agrupados del siguiente modo:

DIFUSIÓN:
- REUNIONES
- MATERIALES
- INTERNET / TIC
MEDIOS DE COMUNICACIÓN (DIVULGACIÓN)
MEDIOS DE COMUNICACIÓN (COMUNICACIÓN)
EDUCACIÓN OFICIAL

La matriz propuesta, principal aportación de este artículo, queda así:

LA DIVULGACIÓN COMO UN PROCESO CENTRÍFUGO. GRUPOS DE DESARROLLO: DIRECCIÓN ESTRATÉGICA Y CÍRCULOS DE DIFUSIÓN.

	CATÁLOGO	GRUPO DIANA				
TIPO DE MATERIAL / ACTIVIDAD	PRODUCTO	1- POLÍTICOS Y GESTORES	2- GRUPOS ESPECIALISTAS (TÉCNICOS, CONSULTORES)	3- GRUPOS INVOLUCRADOS Y AFECTADOS	4- GRUPOS ESCOLARES	5- POBLACIÓN EN GENERAL
DIVULGATIVO INSTITUCIONAL	JORNADA TÉCNICA INSTITUCIONAL					
	PUBLICACIONES					
DIFUSIÓN INTERNA GRUPO DE DESARROLLO	INTRANET					
	JORNADAS TÉCNICAS INTERNAS					
	SEMINARIOS					
	PUBLICACIÓN INTERNA DIGITAL E IMPRESA					
	CUADERNO TECNOLÓGICO					
	GUÍAS					
	INFORMES TÉCNICOS					
DIVULGATIVO ESPECIALIZADO	**FOROS DE ENCUENTRO**					
	CONGRESOS INTERNACIONALES					
	CONGRESOS NACIONALES					
	REUNIONES DE EXPERTOS					
	CONFERENCIAS					
	SIMPOSIOS					
	SESIONES TÉCNICAS EXTERNAS					
	PUBLICACIONES TÉCNICAS SCI					
	PLATAFORMAS TECNOLÓGICAS					

	INTERNET					
	GEOPORTALES					
	SERVIDORES WMS					
	BASES DE DATOS ESPECIALIZADAS					
	STANDS FERIAS COMERCIALES					
	MATERIALES					
	HOJAS DIVULGATIVAS					
	PANELES					
	MONOGRAFÍAS					
FOLLETOS* Y E-FOLLETOS	FOLLETOS PUBLICITARIOS					
	ESTADILLO					
	DÍPTICO					
	TRÍPTICO					
	HOJA					
	PANEL					
	PÓSTER					
	LIBRETO					
	POSTALES					
	TARJETÓN					
	CALENDARIO					
	CRISMA					
PROTECCIÓN	PATENTES, MODELOS DE UTILIDAD…					
SOCIOS TECNOLÓGICOS	CONVENIOS DE COLABORACIÓN					
	ALIANZAS					
OTROS	**MEDIOS DE DIFUSIÓN**					
	PUBLICACIONES TÉCNICAS *SS*					
	REVISTAS					
	CURSOS DE ESPECIALIZACIÓN					
	CAMPAÑAS ESPECÍFICAS					
MEJORAR ACCESO INFO	INTERNET					
	FOROS					
	ENCUESTAS					
CAMPAÑAS s.l. CANALES DIVERSOS	**MEDIOS DE COMUNICACIÓN**					
	RADIO					
	TV					
	PROGRAMAS ESPECÍFICOS					
	REPORTAJES					
	DOCUMENTALES					
	ENTREVISTAS					
	PUBLICACIONES DIVULGATIVAS					

	MONOGRAFÍAS LENGUAJE NO TÉCNICO					
	FOLLETOS NO TÉCNICOS					
	PÁGINAS WEB - *LINKS*-					
	NOTAS DE PRENSA					
	NARRATIVAS AUDIOVISUALES					
	CAMPAÑAS DIVULGATIVAS					
	CAMPAÑAS ESPECÍFICAS					
	INFORMES ESPECÍFICOS LENGUAJE NO TÉCNICO					
PLANIFICACION	PROGRAMAS DE ESTUDIOS					
	PROGRAMA CURRICULAR					
	MÁSTERS					
SEÑALÉTICA	ADECUACIÓN ESPACIOS NATURALES					
	EXPERIENCIAS CON PANELES DIVULGATIVOS					
	SENDEROS ECOLÓGICOS					
ETC.	**VARIOS**					

Tabla 9-01. Matriz y listado de chequeo genérico para el proceso de DyTT combinado con estrategias de educación ambiental. La matriz tiene carácter abierto para su modificación conforme a circunstancias específicas.

El carácter abierto de la matriz quiere decir que cada grupo de desarrollo deberá modificarla adaptándola a cada proyecto y a sus circunstancias específicas de DyTT y EE, que previsiblemente serán diferentes para cada proyecto en sus coordenadas espacio-tiempo.

Además de los grupos genéricos de actividades y materiales, se está cumplimentando un catálogo de productos, cada vez más amplio, que vayan cubriendo los distintos nichos de una estrategia de divulgación.

El listado de materiales y actividades es dividido en grupos, especialmente recomendables para cada Grupo Diana, pero sin carácter exclusivo (la mayoría de los productos son adecuados para cada grupo diana modificando su diseño). No obstante, se han diferenciado ciertos tipos de actividades o materiales más adecuados para cada grupo. En la propuesta inicial se han distinguido seis, diferenciando capítulos en algunos de ellos:

1- Divulgativo institucional.
2- Difusión interna de cada grupo de desarrollo.
3- Materiales y actividades divulgativas para especialistas. Se distinguen cuatro capítulos:
    a. Foros de encuentro.
    b. Internet.
    c. Materiales para ferias comerciales.
    d. Materiales de imprenta.
4- Actividades de protección de resultados.

5- Colaboraciones con socios tecnológicos.
6- Otros, diferenciando publicaciones divulgativas externas no técnicas y “otros”.

Materiales seleccionados para cada “Grupo Diana”

En las columnas situadas a la derecha de los productos, aparecen sombreadas o coloreadas aquellas celdas de cruce de un grupo diana y un producto en el caso de que dicho material sea recomendable. En caso de estar en blanco, no parece procedente, salvo casos excepcionales, diseñar ese tipo de material para ese grupo destinatario.

Impactos

Se trata de una valoración previsible del impacto o efectividad de cada material o actuación para cada grupo diana en el contexto de un círculo de difusión concreto. En principio se distinguen cinco categorías, de acuerdo con la valoración en la legislación medioambiental española; uno será el impacto mínimo y cinco el máximo.

Esta atribución es altamente subjetiva y cada proyecto puede tener impactos diferentes con un material similar.

IMPACTOS E INDICADORES DE CONSECUCIÓN DEL OBJETIVO

Resulta conveniente proponer un indicador que permita evaluar el impacto de cada actividad. Para ello se propone un sistema rangos-pesos; como rango se ha optado por un número correlativo del 5 al 1 (desde “hidrogestores” a la población en general respectivamente). Como peso se propone un nuevo valor del 1 al 5 según la efectividad prevista de cada material o actividad. Además se aplica un factor de ponderación, incrementando en 50 puntos las actividades con rango 5 y peso 5, por ejemplo aquellas actividades específicas para gestores y planificadores de cada Administración o gobierno.

El diseño del indicador propuesto queda así:

$$\text{Indicador} = [\text{rango} \times \text{peso}] + \text{factor de ponderación}$$

Donde:
- Rango: El grupo 1 (políticos/hidrogestores) tiene un rango de 5, …el grupo 5 (población en general) tiene un rango de 1.
- Peso: Impacto subjetivo para cada actividad/material.
- Factor de ponderación: Las actividades/materiales cuyo producto rango por peso sobrepasa el valor de 25, es incrementado con, por ejemplo, 25 puntos más.

En la tabla 2 se presenta una adaptación de esta matriz propuesta para el Grupo Tragsa (compañía donde trabajan dos de los autores). En ella se ha estimado el impacto de cada actividad en cada grupo diana, resultando un indicador. Los valores más altos son las acciones más efectivas *a priori* y viceversa.

A la matriz se ha incorporado, además, una columna de carácter previsto para cada actividad, de 1 (obligado) a 4 (recomendable).

	CATÁLOGO		GRUPO DIANA					
TIPO DE MATERIAL / ACTIVIDAD	PRODUCTO	CARÁCTER	1- CLIENTES DE LA ADMINISTRACIÓN	2- GESTORES DEL GRUPO Y DELEGADOS	3- GESTORES TÉCNICOS (MANDOS INTERMEDIOS)	4- TÉCNICOS	5- GRUPO EN GENERAL	INDICADOR IMPACTO
		1 A 4	IMPACTO 1/5					TOTAL
DIVULGATIVO INSTITUCIONAL	JORNADA TÉCNICA INSTITUCIONAL	3	5	3	2			93
	PUBLICACIONES	3	2	2				18
	NOTAS DE PRENSA	4	5	4	3	2	1	55
DIFUSIÓN INTERNA GRUPO DE DESARROLLO	INTRANET	1			3	3	1	16
	SEMINARIOS TÉCNICOS INTERNOS	1		3	4	5		34
	PRESENTACIÓN CANÓNICA	1		4		3	1	23
	INFORMES TÉCNICOS	1			5	4		23
	PUBLICACIÓN INTERNA TÉCNICA DIGITAL E IMPRESA (HOJA DIVULGATIVA)	1			3	2		13
	FICHA	1			1	1		5
	INFORME TÉCNICO-ECONÓMICO A TERMINO	1		4	4			28
	JORNADAS TÉCNICAS INTERNAS	2		3	5	5		37
	CUADERNO TECNOLÓGICO	3		5	5			35
DIVULGATIVO ESPECIALIZADO	**FOROS DE ENCUENTRO**							
	SESIONES TÉCNICAS EXTERNAS	3		4	4	4		36
	PUBLICACIONES TÉCNICAS / SCI	3			5	3		21
	IMPARTIR CURSOS DE ESPECIALIZACIÓN	3		3	5	3		33
	PLATAFORMAS TECNOLÓGICAS	4	4	5				4
	INTERNET							
	FOROS EN INTERNET	3			2	2		1
	GEOPORTALES	4	3		4			27
	PÁGINA WEB PROPIA (1)	4	3	4	4	3	1	5
	PÁGINAS WEB - *LINKS* -	4			1	1		5
	FERIAS COMERCIALES							
	PANELES PARA STANDS	4	3	4	1	1	1	37
	MATERIALES DE IMPRENTA							
	FOLLETO PUBLICITARIO DIVULGATIVO	2		3	2			18
	PÓSTER (PLOTEO Y DIGITAL)	2		1	2	3		16
PROTECCIÓN	PATENTES, MODELOS DE UTILIDAD (2)	3	5	5	5			110
SOCIOS TECNOLÓGICOS	CONVENIOS DE COLABORACIÓN	2	4	5				4
	CONSORCIOS	4	3	4	4			43
OTROS	**PUBLICACIONES DIVULGATIVAS**							
	FOLLETOS NO TÉCNICOS	2					3	3
	NARRATIVAS AUDIOVISUALES	3	3	3	3	3	3	45
	OTROS	1 A 4						

Tabla 9-02. Matriz genérica para el proceso de DyTT + EE adaptada para y propuesta al Grupo Tragsa para la difusión de proyectos de i+D+i relacionados con el agua y especialmente con la gestión hídrica.

Las actividades con mayor impacto (indicador mayor de 40, son, por este orden, las patentes, jornada técnica institucional (con invitados de altos cargos de la Administración y clientes actuales y potenciales), notas de prensa, narrativas audiovisuales y participación en consorcios con publicidad.

Actuaciones en el marco del proyecto DINA-MAR

Teniendo en cuenta los grupos de destinatarios enunciados anteriormente, se han llevado a cabo o está previsto realizar en el futuro distintas estrategias. Algunas son destacadas a continuación, otras se agregan al artículo como anexo 1.

DIRIGIDAS A LOS GRUPOS ESPECIALISTAS Y A LAS PERSONAS CON CAPACIDAD DE RESOLVER EL PROBLEMA

- Crear y organizar foros de encuentro. Se proponen como iniciativas, las siguientes:

· Organización, a nivel nacional, de jornadas técnicas y un Congreso sobre MAR.

· Promocionar la creación de medios de difusión, tales como la publicación de números monográficos que atiendan los diferentes aspectos tecnológicos y bibliográficos necesarios para la buena información y formación de todo interesado en profundizar en el tema. Gran parte de ellos deberían ir redactados en lenguaje sencillo y de fácil comprensión para usuarios no especialistas.

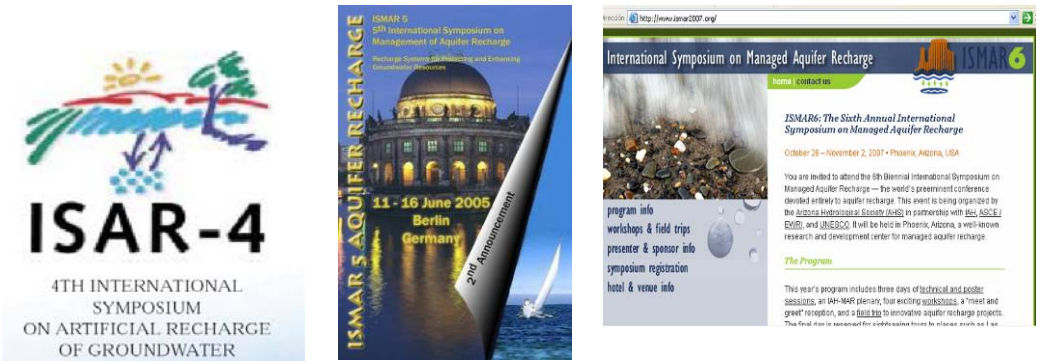
· Organizar cursos de especialización o "master" en MAR en los que se incluyan visitas monitorizadas a las estructuras y experiencias ya existentes.

· Edición de forma periódica (anual) de informes técnicos con las últimas novedades o experiencias, en especial las mejoras técnicas disponibles y nuevos descubrimientos relativos a la calidad de las aguas, técnicas de tratamiento del suelo y acuífero, parámetros de gestión, programas de vigilancia y control, códigos de buenas prácticas, uso de la AR para objetivos medioambientales, creación de espacios de ocio, etc. (Figuras 9-06).

· Planteamiento y presentación de una candidatura para la celebración en España de las Jornadas Internacionales sobre Recarga de Acuíferos similares a los celebrados con anterioridad, como los celebrados en Florida, Anaheim, TISAR-98 en Ámsterdam, ISAR-2002 en Adelaida, ISMAR-2005 en Berlín, ISMAR 6 en Arizona o ISMAR 7 en Abu Dhabi (Figuras 9-07).

· Organizar jornadas y cursos específicos dirigidos a profesionales que deseen mejorar su formación, tanto en un ámbito nacional como internacional (Figuras 9-08).

Figuras 9-06 a) y b). Participación en foros técnicos con presentación de novedades y experiencias en MAR. EXPO Zaragoza y CONAMA.



Figuras 9-07 a) y b). La IAH organiza simposios periódicos sobre MAR. España podría ser país candidato para el futuro próximo.

DIRIGIDAS A LA POBLACIÓN EN GENERAL

· Organización de campañas de divulgación general, utilizando los grandes medios de comunicación, radio y televisión, con programas específicos, reportajes, documentales, entrevistas, etc., en programas ya existentes y que están especializados en temas medioambientales y en diferentes emisoras/cadenas.

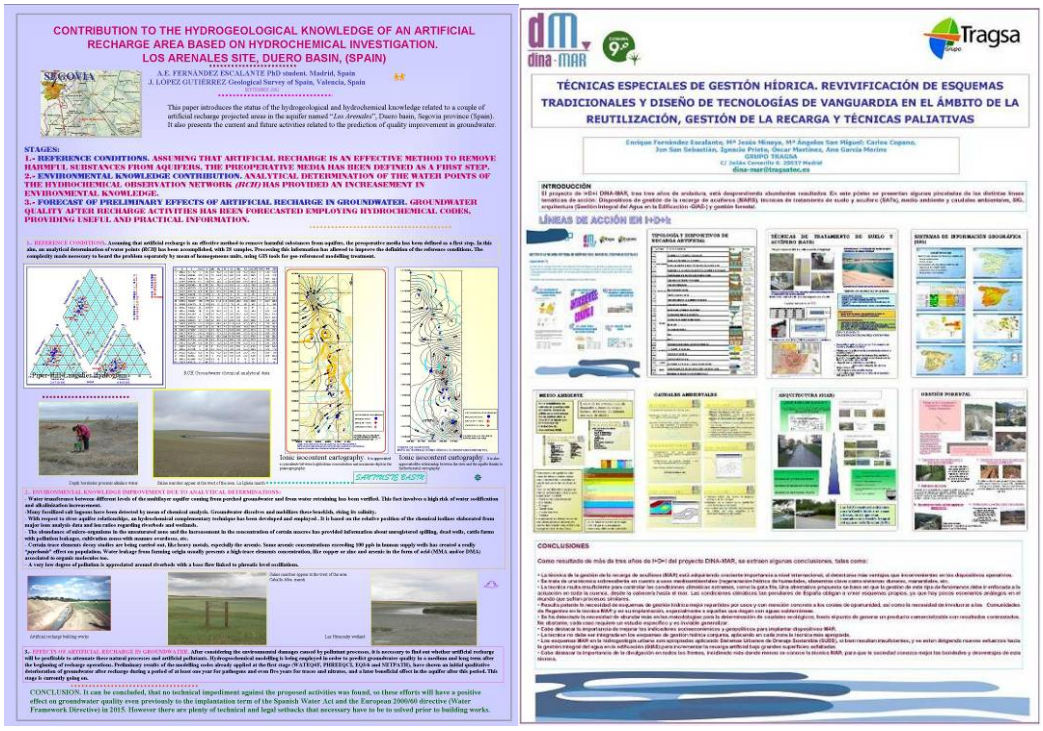
· Adecuación y ambientación de lugares donde han tenido lugar experiencias de recarga artificial. Para ello se está comenzando a instalar paneles indicativos y explicativos en senderos ecológicos autoguiados (rutas hidrogeológicas).

· Publicaciones divulgativas que atiendan la problemática general del agua y las diversas soluciones existentes, explicación, pros y contras, sin dejar de lado su contexto legal.

· Notas de prensa descriptivas en ediciones impresas y digitales (Figuras 9-09).

· Creación de páginas Web informativas y amenas relacionadas mediante links con las principales páginas técnicas y educativas (Figuras 9-10).

Figuras 9-08 a) y b). Visita guiada a las instalaciones de ASR para el almacenamiento profundo en Adelaida, (ISAR 4) y a las instalaciones de recarga artificial y abastecimiento de Berlín (ISMAR 5).



Figuras 9-08 c) y d). Pósters divulgativos de experiencias españolas presentados en foros técnicos nacionales e internacionales.

Figuras 9-09 a) y b). Notas de prensa en edición digital y en papel.

DIRIGIDAS A LAS PERSONAS INVOLUCRADAS Y AFECTADAS POR LA SEQUÍA

· Facilitar el acceso a la información: Creación y mantenimiento de una página Web específica sobre el agua como recurso y todos los temas asociados. Además, en la página se crearán mecanismos de participación pública: foros de encuentro, encuestas, sondeos de opinión, etc.

· Campañas divulgativas, como las que suele realizar el gobierno, fomentando pautas de consumo y ahorro y códigos de buenas prácticas agrarias.

· Campañas específicas de información sobre recarga artificial de acuíferos y temas asociados, con la publicación de folletos divulgativos de fácil comprensión. Hasta la fecha se han desarrollado en el marco del proyecto DINA-MAR siete dípticos (anexo 2):

Otros títulos propuestos son:

- La recarga artificial de acuíferos y la restauración de humedales y zonas húmedas degradadas.
- La mejora cualitativa de las aguas contaminadas gracias a operaciones de recarga artificial de acuíferos.
- Guía de buenas prácticas en operaciones de recarga artificial de acuíferos.
- Gestión de la recarga artificial y desarrollo rural.

DIRIGIDAS A GRUPOS ESCOLARES

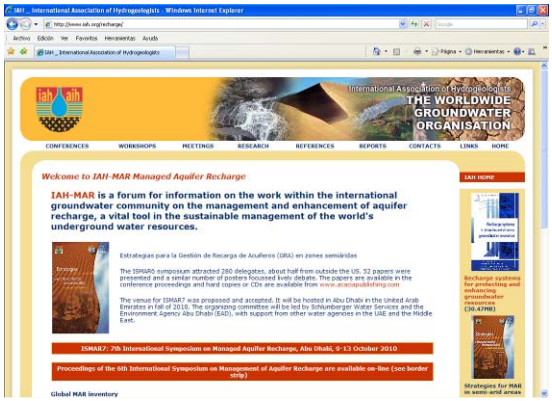
Inclusión, dentro del programa curricular, de aspectos relacionados con el recurso agua y temas asociados. Entre los principales aspectos a tratar destacamos:

- El agua como recurso natural.
- Los usos y aprovechamientos del agua.
- Pautas de consumo y ahorro.
- La recuperación y reutilización: procesos de depuración y reutilización de aguas residuales.
- Sistemas de almacenamiento de agua.
- Técnicas especiales: desalación, gestión de la recarga de acuíferos y trasvases. Pros y contras.

En la asignatura optativa del 2º curso de bachillerato (preludio de la Universidad) "Ciencias de la Tierra y medioambientales" se trata ampliamente el tema de los recursos hídricos, sin embargo la técnica MAR no aparece en los textos ni, por supuesto, en la programación.

De los aspectos mencionados, los tres últimos son los menos tratados en los centros educativos, y es aquí específicamente donde se encuadra la recarga artificial de acuíferos.

El tratamiento de la información debe ser absolutamente técnico, evitando politización alguna.



Figuras 9-10 a) y b). Páginas Web del grupo de trabajo de recarga artificial de acuíferos de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH). Fuente: http://www.iah.org/recharge/ y del proyecto DINA-MAR.

Estas estrategias son complementadas con el listado presentado como Anexo 1.

CONCLUSIONES

Los estudios de recarga artificial de acuíferos llevados a cabo en todo el mundo están mejorando el grado de conocimiento a una velocidad vertiginosa, si bien quedan numerosos aspectos pendientes de investigación, que pueden ser abordados presentando estrategias de educación ambiental adecuadas y llevándolas a la población.

Cabe esperar que gran parte de las innovaciones tecnológicas futuras contribuyan eficazmente a la gestión hídrica, tanto para aguas superficiales como subterráneas. Para ello es preciso facilitar el acceso a la información y mejorar la educación e información hidrológica de los usuarios, facilitando así su participación.

La técnica MAR puede y debe ser presentada y divulgada entre los ciudadanos, quienes deben conocer su potencial. De este modo podrá ser aplicada a un número de experiencias mayor. Esta divulgación creemos que debe realizarse a nivel general, es decir, de toda la población, de tal forma que el ciudadano, tal y como promueve la educación ambiental, debe tener un conocimiento crítico de los problemas medioambientales y tener mecanismos a su alcance para desarrollar su participación activa en la resolución de los mismos.

Es la Administración General del Estado la responsable de facilitar los mecanismos de participación y de mejorar el nivel de información y formación de las personas implicadas y de la sociedad en general.

BIBLIOGRAFÍA

- Argadon, A. (2003). "Harvard Business School Working Knowledge for Business Leaders", August 4, 2003.
- Fernández Escalante, E. (2005). "Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales. Aspectos cualitativos y medioambientales. Criterios técnicos derivados de la experiencia en la Cubeta de Santiuste, Segovia". Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- Fernández Escalante, E. (2010). "The Three Water Ways. Itinerary Guide". Dina-mar D&TT process. Tragsa Group. Grafinat, 2010. Available at www.dina-mar.es
- Fernández Escalante, E. (2010). "Caminitos de Agua. Tres rutas hidrogeológicas en la provincia de Segovia. Guía de interpretación". Dina-MAR-Tragsa Group. Grafinat, 2010 (in press).
- Fernández Escalante, E. y Cordero Sánchez, R. (2006). "Esbozo de una estrategia para acercar la recarga artificial de acuíferos a la población mediante la educación ambiental". Ecosistemas 15 (1). Enero 2006.
- Fernández Escalante, E, López Hernández, M y Cordero Sánchez, R. (2009). "Environmental education criteria applied to hydrogeology and specially to managed aquifer recharge. A strategic proposition and some examples for Spain". International Groundwater Symposium Thailand 2009 (IGSTH 2009). Efficient Groundwater Resources Management. Bangkok, Feb. 2009. Abstract book.
- González Hermoso de Mendoza, A. y Rodríguez Duarte, A. (coord.) (2006). "Cooperación tecnológica entre centros públicos de investigación y empresas". Madri+d. CAM.
- IUCN (1970). "Environmental conservation education problems in India". Proceedings of the Working Meeting of the IUCN Commission on Education, held at Forest Research Institute and Colleges, Dehra Dun, India, 21-22 November 1969. IUCN Commission on Education - Morges: IUCN, 1970.
- MCI (2008). Plan Nacional de I+D+i 2008-2011. Ministerio de Ciencia e innovación. Gobierno de España.
- Morales, J. (1998): "Guía práctica para la interpretación del patrimonio. El arte de acercar el legado natural al público visitante". TRAGSA, Junta de Andalucía. Colección Difusión, 1998.
- Santiuste Bermejo, V. (2002). "Historia y formación de la psicología del aprendizaje. Formación de profesores de educación secundaria". Instituto de Ciencias de la Educación, 2002: Pág. 198.
- SISE & FECYT (2007). "Indicadores del Sistema Español de Ciencia y Tecnología 2007". Monografía elaborada en el marco del "Sistema Integral de Seguimiento y Evaluación (SISE)" de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT). Madri+d. CAM.
- Tapp, L. (2002). "Business strategy of co-operation and learning. Business education. Financial Times Survey". 25 de Marzo de 2002.
- UN (1972). United Nations Conference on Human Environment. Stockholm, 1972.
- UNESCO IHP (2002). "Managing Aquifer Recharge". 12 Pág. www.iah.org/recharge

- http://www.iisd.org/measure/compendium/
- http://lead.virtualcentre.org/en/dec/toolbox/Refer/psrbasic.htm

- www.uax.es/publicaciones/tecnologia.htm.
- www.dina-mar.es
- www.iagua.es
- http://webs.uvigo.es/disenoindustrial/docs/Lecturas/Gestion_tecnologia.pdf

ANEXO 1. LISTADO DE ACTUACIONES DE DIFUSIÓN, TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA Y EDUCACIÓN AMBIENTAL REALIZADAS HASTA LA FECHA EN EL MARCO DEL PROYECTO DE I+D+i DINA-MAR

- Presentaciones a la administración
Directas: Visitas guiadas al campo con funcionarios y miembros del MARM para enseñarles los dispositivos construidos por Tragsa en Santiuste y Carracillo (Confederación del Duero, MARM)
Indirectas: presentación de artículos y ponencias en foros con presencia elevada de cargos de la Administración:

- Jornadas Internas
Reuniones de trabajo con carácter, al menos, cuatrimestral entre los miembros del equipo investigador.

Jornadas interna y externa en el ecuador de la fase de desarrollo tecnológico del proyecto. Ambas jornadas fueron de puertas abiertas. Igualmente está previsto celebrar una jornada técnica externa de cierre del proyecto.

- Jornadas Externas
Participación y presentación de ponencias en, al menos, siete jornadas internacionales y cinco nacionales.

- Publicaciones
Edición de cuatro libros, publicación de tres artículos en revistas científicas (una más en prensa), nueve más en ponencias y comunicaciones de congresos publicadas (tres más en prensa) y once publicaciones menores (tres más en prensa).

- Redacción del Plan de DyTT
Se ha planteado un plan de divulgación y transferencia de tecnología aplicando técnicas de difusión clásicas, otras de educación ambiental y técnicas psicosociales. Estas han sido canalizadas en un proceso centrífugo desde el grupo "generador del conocimiento" hacia cinco "grupos diana" o destinatarios del mismo.

- Página Web www.dina-mar.es
Desde la primera etapa se ha planteado el diseño de una página Web para expresión de resultados y publicitar el proyecto, la empresa y nuestra capacidad técnica. La página ha ido creciendo con el tiempo incorporando tecnologías de comunicación más avanzadas. En la actualidad tiene formato de Blog, permite expresar opiniones (Blog) y la carga por tres administradores. Actualmente se está incorporando un Hidrogeoportal o visor para hacer cálculos algebraicos con mapas de hidrogeología.

- *Log analizer* (analizador de logs del servidor Web)
Además se ha implantado un sistema para controlar la estadística de visitas a la página Web. Algunas publicaciones han tenido cierta difusión en otros medios como el CEDEX, I-Agua y la Web de la UPC, como la ruta hidrogeológica, la actualización del inventario de dispositivos a nivel nacional, la recopilación de leyes que afectan al

ámbito del proyecto o la divulgación de la jornada técnica de 30 de junio de 2008 y de sus resultados.

- Links
Se han añadido y vinculado mediante links la página del proyecto con algunas ajenas, tales como iah.org/recharge, colegio de ingenieros geólogos, etc.

- Hidrogeoportal
Se ha iniciado la elaboración de un Geoportal vinculado a la página Web del proyecto. Se trata de un visor cartográfico con las zonas MAR que permite un proceso de cálculo para conocer el dispositivo más apropiado para cada caso. Está previsto alojar el Geoportal en el mismo servidor que el de la página Web del proyecto.

- Dípticos y hojas divulgativas
A los tres diseñados en la fase de definición se han añadido cuatro adicionales en español y traducido al inglés los cinco últimos (disponibles en la Web del proyecto y presentados como anejo al artículo).

- Artículos divulgativos (no científicos)
Se ha publicado un artículo en la revista agricultura nº 903 dirigido a comunidades de regantes y lectores no especialistas.

- Colaboración monografías
Se ha colaborado en la redacción de la monografía del Boletín Geológico y Minero 120, monográfico sobre la "gestión de la recarga artificial de acuíferos".

- Encuestas
Al término de la jornada técnica del 30 de junio de 2008 fue repartida una encuesta a los asistentes. Con el tratamiento de los resultados se ha elaborado un acta-resumen, que ha sido traducida al inglés y colgada en la página Web del proyecto con un link desde la propia página del Grupo de Trabajo IAH-MAR.

- Mesas redondas
Dos participantes del Grupo en este proyecto de I+D+i participaron en la mesa redonda de la JT-6 en CONAMA 8.

- Estaciones DINA-MAR ZNS.
Son estaciones de toma de datos de la Zona No Saturada en las dos zonas regables donde se toman los datos para alimentar al proyecto. Las estaciones cuentan con un cartel indicando qué son con los logos de Tragsa y de DINA-MAR. Ambas cuentan con fotografías colgadas en Internet.

- Calendario
Se ha diseñado un calendario del año 2008 sobre la temática MAR, de distribución restringida, que más tarde fue publicado en la Web del proyecto.

- Cris-MAR
Acción divulgativa con un motivo navideño y técnico (los camellos de los Reyes Magos están bebiendo con pajitas de un acuífero que está siendo recargado a su vez). Acción

"alternativa" de difusión apoyada en un diseño vistoso y originalidad, de distribución seleccionada.

- Wikipedia
Se ha cargado la definición de recarga artificial en la "Wiki" con alusiones y reseñas permitidas al proyecto Dina-mar. Otras fueron filtradas.

- Paneles
Se han instalado tres paneles divulgativos de aluminio en el campo (el *demostration site* de Santiuste), de modo que cuando asiste una visita técnica guiada por el equipo investigador, se comentan los aspectos técnicos apoyados en el panel.

- Ruta hidrogeológica
Con el nombre "Caminitos de agua" se han planteado tres rutas visitables, destacando el valor didáctico de cada una, relacionadas con sistemas de recarga artificial construidos por el ministerio de Agricultura (actual MARM) y la junta de Castilla y León en Segovia. La ruta se ha complementado con una guía de visita y un fichero GPX (en formato de intercambio válido para cualquier marca de GPS), que se descargan de la Web del proyecto, para facilitar los desplazamientos en campo autoguiados por un GPS.

- Participación en máster
Se ha colaborado con la impartición de dos máster, uno de la URJC y UA (2009 y 2010) y otro de la UPM (2010). En ambos se ha acompañado al alumnado al campo, ejerciendo una labor de guía técnica y divulgativa.

- Televisión
La ponencia oral presentada en la EXPO de Zaragoza fue retransmitida, como todas las de la Tribuna del Agua, en el canal interno de la EXPO, con salida a la ciudad de Zaragoza.

- Conferencias didácticas de carácter universitario
El 29 de abril y 21 de mayo se 2010 de han impartido dos conferencias divulgativas en la Facultad de CC Geológicas de la UCM de puertas abiertas y con anuncios previos en las Web de la Facultad y en la del proyecto.

- Participación en Grupos de trabajo
Se colabora en los grupos de trabajo IAH-UNESCO-MAR, MAR-NET e IAH-MAR-GE (Grupo español), participando en los foros cuando hay noticias de interés o se genera algún material divulgativo. Se han añadido y vinculado mediante links la página del proyecto con las de los grupos de trabajo, tales como iah.org/recharge. En los informes internacionales de los Grupos de Trabajo hay menciones a DINA-MAR y al Grupo Tragsa.

-DINA-MAR-*movie*
Se está preparando un corto divulgativo sobre la recarga artificial en España y algunas experiencias del extranjero.

- Participación en foros
Se está dedicando una ligera participación en foros específicos internacionales, en concreto el de la IAH.

- Traducciones de materiales
Se han realizado traducciones por ejemplo del díptico divulgativo de MAR-NET, que estaba solo en inglés, de la introducción de los libros P-ISMAR, etc.

- Actualización de la base de datos de técnicos y gente en general interesada en la técnica
Con carácter interno se actualiza de modo permanente el listado de técnicos potencialmente interesados en la técnica MAR y en los resultados del proyecto de investigación.

- Tesis doctoral
Se publicita en la Web y en las comunicaciones orales la posibilidad de descarga gratuita de la tesis doctoral del RT del proyecto.

- Grupos de amigos
Hemos introducido el logo de DINA-MAR en grupos de amigos, p.e. The Water Channel, estamos estudiando su inclusión en el Facebook, etc.

- Otros
Se han cargado fotos de los dispositivos operativos de Tragsa en Google Earth, etc.

- Glosario
Se ha participado en la elaboración del glosario de términos hidrogeológicos por invitación del IGME, para el capítulo de recarga artificial.

- Etc.

ANEXO 2. DÍPTICOS Y OTROS MATERIALES DIVULGATIVOS ELABORADOS DURANTE EL PROYECTO

El fichero pdf de estos dípticos puede ser descargada de la página Web del proyecto en español y en inglés.

GESTIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS

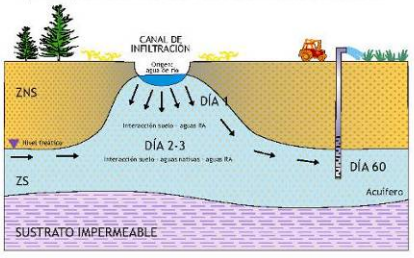
La gestión de la Recarga de Acuíferos o "Managed Aquifer Recharge" (MAR) en el marco del desarrollo sostenible

¿En qué consiste la Recarga de Acuíferos?

Se trata de un método de gestión hídrica que permite introducir agua en acuíferos subterráneos. El origen del agua destinada a este fin puede ser muy diverso, en general procede de ríos, si bien puede ser originaria de depuradoras, desaladoras, etc. Una vez almacenada en los acuíferos, puede ser extraída para distintos usos (abastecimiento, riego, etc.) servir de barrera contra la intrusión marina y contaminación, u otros usos especificados más adelante.

Esta técnica es considerada una *Driving Force* o actividad capacitada para provocar un impacto (positivo o negativo) sobre la cantidad y la calidad de las masas de agua.

PERFIL TIPO DE UN DISPOSITIVO DE RECARGA ARTIFICIAL (CANAL) EN "CONTROL LATERAL" EN UNA ZONA REGABLE



El agua, que puede proceder de ríos, depuradoras, escorrentía urbana e incluso humedales, es introducida al acuífero mediante zanjas, balsas, pozos, sondeos de inyección, etc. cuando hay recurso en suficiencia, generalmente en invierno. Este agua es almacenada en el acuífero en cantidad superior a lo normal, y sigue su circuito natural subterráneo por el acuífero, depurándose, durante un periodo de tiempo variable. Cuando hace falta, por ejemplo en la época estival, es extraída y empleada para abastecimiento, regadío, etc. generalmente con una calidad adecuada.

Utilidades y ventajas de la técnica MAR

La técnica MAR es considerada una alternativa de gestión hídrica de primer orden en varios lugares del mundo, mientras que en nuestro país se considera una técnica especial que suscita un cierto escepticismo a pesar de su gran potencial. A continuación se presentan algunos pros y contras:

- Almacenar agua en los acuíferos, especialmente en zonas de escasa disponibilidad de terreno en superficie o sin posibilidad de otras formas de embalsamiento.
- Eliminación de patógenos, sustancias químicas... del agua durante el proceso de infiltración a través del suelo y su posterior residencia en el acuífero, suavizando diferencias cualitativas y reduciendo riesgos medioambientales, incluidos aquellos para la salud.

- Utilización del acuífero como embalse regulador, almacén y red de distribución dentro de un sistema integrado, permitiendo suavizar fluctuaciones en la demanda y reducir el descenso del nivel del agua por sobrebombeo.
- Reducir las pérdidas por evaporación respecto a presas y balsas y compensar la pérdida de recarga natural en un acuífero por actividades antrópicas.
- Integración de actividades lesivas en el marco del desarrollo sostenible, tales como el tendido de barreras hidráulicas para la intrusión marina, la prevención de problemas geotécnicos, la evacuación y depuración de aguas residuales urbanas (reutilización), la regeneración hídrica de elementos clave (humedales, surgencias, etc.).
- Mejora económica zonas deprimidas.
- Intervención en el combate a la desertización y cambio climático, acarcavamiento, erosión de suelos, etc.

Inconvenientes de la MAR

- Grado de conocimiento incipiente de su potencial
- Visión principalmente hidráulica de la política de gestión hídrica en el país, que la considera una "técnica especial"
- Escasez y falta de continuidad en las experiencias, que van cobrando importancia creciente. Ej MAPA, 2002/03
- Escasa dedicación en las publicaciones de gestión hídrica del país hasta la fecha
- Es preciso un control durante el diseño y construcción, así como realizar varios estudios y proyectos para minimizar los riesgos e impactos ambientales

Comparativa con otras técnicas de gestión hídrica

Algunos análisis económicos realizados indican que el agua procedente de la gestión de la recarga de acuíferos (MAR) tiene unos costes ligeramente inferiores al coste medio del agua desalada y más de la mitad del agua embalsada en presas y balsas.

Aunque el agua recuperada tras la recarga artificial puede necesitar ser tratada, su salinidad siempre será inferior a la del agua del mar, por tanto, la energía requerida en el proceso y sus costes son menores a los de la desalinización.

CONTACTO

Para más información contactar con:

Enrique Fernández Escalante
Tel. 913 226 106
dina-mar@tragsatec.es

GESTIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN ESPAÑA

Experiencias técnicas

Experiencias en España

En España hay desarrollados varios tipos de dispositivos de recarga artificial. En Cataluña predominan dispositivos de infiltración por pozos y sondeos en el aluvial de ríos, escarificación del lecho e incluso un sondeo de infiltración profunda.

En el resto del arco mediterráneo e islas Baleares predominan los pozos, galerías y balsas de infiltración, con abundantes diques de retención y boqueras en el este peninsular.

En las zonas de meseta predominan los dispositivos de recarga artificial superficial por canales y zanjas (Segovia). Hay además instalaciones con pozos en el aluvial de ríos (Valladolid, La Rioja).

En Madrid y Castilla-La Mancha las experiencias principales se han realizado mediante sondeos profundos.

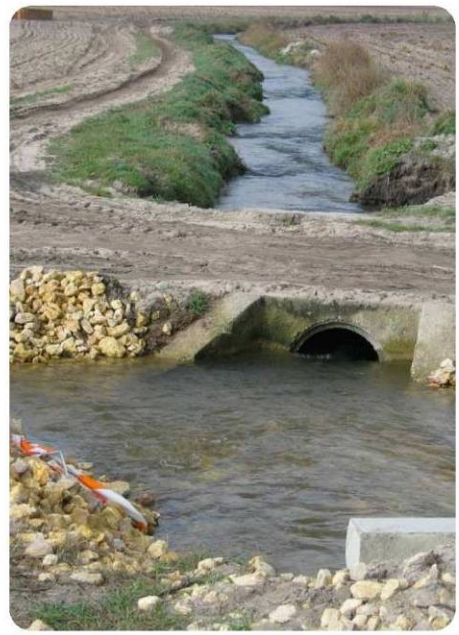
En Andalucía Central hay sistemas de acequias (careos), drenajes de minas y sondeos; mientras que en la Occidental predominan los pozos y balsas como dispositivos de infiltración inducida.

Experiencia en Europa

Se han inventariado al menos 40 dispositivos y experiencias distribuidos en 18 países. Por citar algunos ejemplos destacables, las ciudades de Dusseldorf y Budapest dependen en un 100% de las aguas de MAR, Berlín en un 75%, etc.

Experiencia del Grupo Tragsa

El grupo Tragsa inició su actividad en la década de los 90, planificando y ejecutando obras para recarga artificial en zonas forestales en la cabecera de las cuencas, especialmente mediante diques, caballones, etc. El primer dispositivo experimental de MAR fue realizado en 1996 en la cuenca alta del Guadiana, introduciendo aguas al acuífero 23 mediante sondeos en las inmediaciones de Alcázar de San Juan.



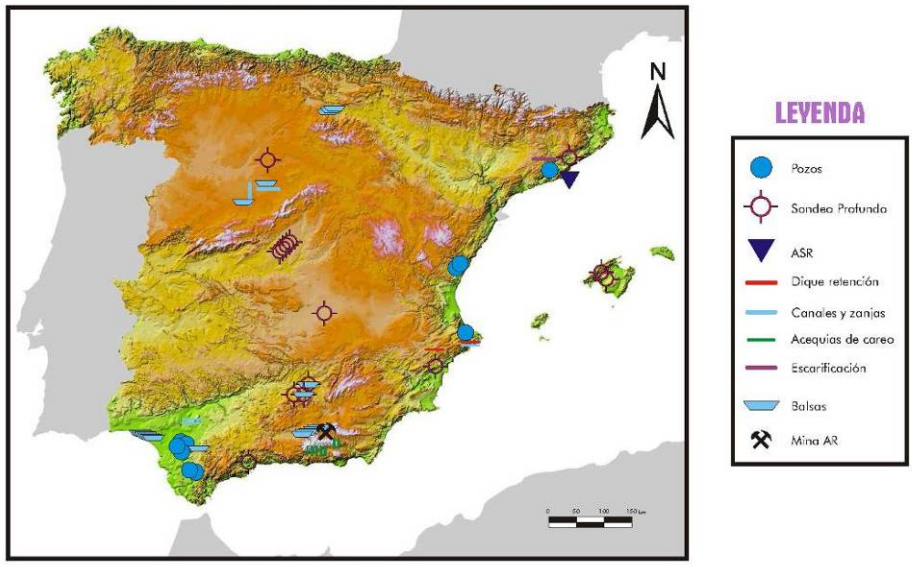
En torno al año 2000 completó el inventario de acequias de careo en el Parque Nacional de Sierra Nevada (Granada y Almería), georreferenciando 23 acequias y llevando a cabo 36 intervenciones en varios tramos de acequias, al menos siete de careo, incrementando su efectividad sin perder su originalidad.

Hasta la fecha ha llevado a cabo el proyecto y construcción de nuevos dispositivos de MAR, en unos casos pozos y sondeos, y otros de gran envergadura destinados al regadío, destacando los dos localizados en la Cubeta de Santiuste y Carracillo (Segovia), promovidos y financiados por la Dirección General de Desarrollo Rural (MAPA) y la Junta de Castilla y León.

Se trata de dispositivos que toman agua del río Eresma y Cega y Pirón, respectivamente, y a través de una tubería hacen llegar el caudal derivado a un dispositivo superficial tipo canal, con hasta 12 km de longitud, con balsas intercaladas, que permite la infiltración de aguas en el acuífero en invierno y el riego con las mismas en verano.

La ocupación del terreno es mínima frente a la superficie ocupada por embalses tradicionales y los costes del agua son asumibles y descendentes a medida que se avanza en el conocimiento de la técnica.

DISPOSITIVOS OPERATIVOS EN ESPAÑA



- Sistemas ASR en Cornellá (AGBAR), pozos y sondeos de infiltración y escarificación/AR del lecho de los ríos Besós y Llobregat por la SGAB-ACA en Parejá y el Papiol (Baix LLobregat).
- Dispositivos recarga artificial superficial del MAPA (canales y balsas) en las comarcas de Santiuste y Carracillo (Segovia).
- Un sondeo profundo del IGME en el valle del Esgueva (Valladolid).
- Tres balsas de infiltración en el aluvial del Río Oja (La Rioja).
- Un sondeo profundo en Madrid del Canal de Isabel II ensayado en 2001 y tres nuevos sondeos operativos en espera de concesión de la CHT.
- Pozos infiltración en la Plana de Castellón y Vall Dúxo (Castellón).
- Un sondeo profundo y represas en Jijona, diques y pozos con galerías en el acuífero de Orba y en la cuenca media y alta del río Girona, Vergel-Setla, recarga artificial desde manantiales en Olivereta, balsas de infiltración en el acuífero de Masets-Alcoyes, Torremanzanas, galerías y pozos en la Plana de Gandía-Denia, sector Vergel-Els Poblets y diques en el acuífero de Jávea (Alicante).
- Conducción y ocho pozos de inyección por bombeo en S´Estremera (Mallorca).
- Un sondeo profundo en Mancha Real, dos zanjas de infiltración y dos sondeos en Alcalá la Real y un sondeo profundo en Valdepeñas de Jaén (Jaén).
- Cinco balsas de infiltración en la vega y dos balsas en las Dehesas de Guadix, infiltración del agua de drenaje de la mina de Alquife, al menos 23 acequias de careo de origen árabe (siglos XIII a XV) operativas en la actualidad en la falda de Sierra Nevada (Granada y Almería).
- Fosas de infiltración en las calcarenitas de Carmona y pozos y zanjas de infiltración en el Aluvial del bajo Guadalquivir (Sevilla).
- Un sondeo profundo en Marbella (Málaga).
- Pozos rellenos de grava en el aluvial del Guadalete (Cádiz).
- Al menos seis balsas de infiltración en Mazagón (Huelva).
- Sondeos profundos experimentales junto al Canal del Guadiana en Alcázar de San Juan (Ciudad Real).

CONTACTO

Para más información contactar con:

Enrique Fernández Escalante
Tel. 913 226 106
dina-mar@tragsatec.es

EL PROYECTO DINA-MAR. GESTIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN EL MARCO DEL DESARROLLO SOSTENIBLE

Se trata de un **proyecto de I+D+i** financiado por el Grupo Tragsa cuyo objetivo es determinar qué zonas de España son susceptibles para operaciones de recarga artificial de acuíferos (AR) y gestión de la recarga artificial o Managed Aquifer Recharge (MAR), en el marco del desarrollo sostenible y bajo normas de mínimo impacto ambiental.

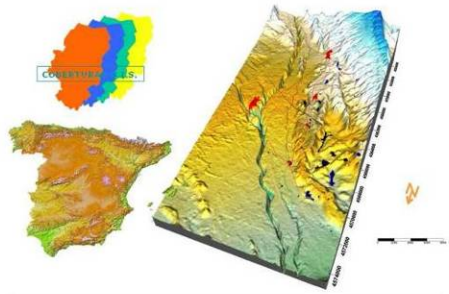
El proyecto que consta de 5 fases se ha iniciado con un amplio estudio del "estado del arte", especialmente a nivel nacional. Hasta la actualidad, la técnica ha sido escasamente desarrollada. Cabe destacar, además de las actividades promovidas por el MAPA en el acuífero de los Arenales (Segovia), los estudios realizados sobre el tema por el Instituto Geológico y Minero de España y las experiencias en Cataluña.

FASE 1: Determinación de las formaciones geológicas objetivo para la recarga artificial

El proceso de cálculo se apoya en el análisis GIS empleando para ello más de 30 coberturas temáticas ensayando distintos métodos deductivos.

Análisis GIS. Primeros resultados

- El área total calculada (España peninsular e Islas Baleares) oscila en el intervalo de 27.000 a 43.000 km² en zonas de acuífero en las inmediaciones de cauces fluviales de cierta entidad, la mayoría con implantación de zonas de regadío con aguas subterráneas.
- El área del terreno susceptible de albergar volúmenes adicionales a los aportados por la recarga natural con uso forestal, generalmente ubicado en las cabeceras de cuenca, es ligeramente inferior a 9.000 km².
- Los terrenos asociados a cauces fluviales o humedales con la misma particularidad del caso anterior alcanzan los 10.500 km²



Nº	CUENCA	Cruce 2 (km²)	%	Cruce 3 (km²)	%
1	NORTE II	1	0,01	1473	3,48
2	DUERO	2699	25,95	11113	26,23
3	TAJO	973	9,35	5515	13,02
4	GUADIANA I	881	8,47	2972	7,02
4	GUADIANA II	24	0,23	91	0,22
5	GUADALQUIVIR	1406	13,51	3500	8,26
6	SUR	468	4,50	1674	3,95
7	SEGURA	494	4,74	1633	3,85
8	JUCAR	1224	11,77	5884	13,89
9	EBRO	1822	17,51	6599	15,58
10	C.I. DE CATALUÑA	413	3,97	1910	4,51
TOTAL		10403	100,00	42364	100,00

Resultados preliminares del área susceptible para ser recargada de modo artificial de acuerdo con primer análisis GIS

FASE 2: Establecimiento y control en "Zonas piloto"

Se ha comenzado la toma de datos en continuo en dos zonas piloto, estando previsto añadir dos más con brevedad. En ellas se llevan a cabo estudios con objeto de determinar la evolución de las tasas de infiltración y probar la efectividad de prototipos de dispositivos de recarga artificial de acuíferos (AR).

FASE 3: Estudio y diseño de dispositivos específicos para lograr una alta tasa de infiltración

Se apoya en la técnica de escenarios análogos. Actualmente se están realizando ensayos de diferentes dispositivos de recarga artificial de acuíferos en las zonas piloto, con objeto de establecer la técnica más adecuada a cada una de las posibles zonas de aplicación.

FASE 4: Aspectos Medioambientales

a) MANTENIMIENTO DE CAUDALES ECOLÓGICOS

Se está desarrollando una metodología para establecer qué caudales ambientales deben ser preservados en los cauces fluviales de toma, en función de varios aspectos hidrológicos y ambientales.

b) REGENERACIÓN HÍDRICA ELEMENTOS CLAVE

Entre ellos cabe destacar la regeneración hídrica de humedales mediante AR, como es el caso de la experiencia

llevada a cabo por la JCL y el Grupo Tragsa en la laguna de la Iglesia de Coca (Segovia). Otros aspectos adicionales son la recuperación de manantiales, restauración de sistemas dunares, etc.

c) SUDS

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible favorecen la infiltración del agua superficial en las áreas urbanas, y se perfilan como un instrumento a utilizar en un adecuado modelo de gestión medioambiental sostenible.

d) INDICADORES MEDIOAMBIENTALES

En paralelo a la investigación de la técnica se está elaborando una serie de nuevos indicadores ambientales que permita obtener una aproximación del efecto real de la posible implementación de las infraestructuras de recarga artificial de acuíferos y criterios de Evaluación de Impacto Ambiental

FASE 5. Educación Ambiental y Divulgación

El proyecto contempla la divulgación de la información generada en diversos ámbitos diferenciados por grupos de actuación, así como difundir premisas de educación ambiental. En este sentido se esta diseñando y comunicando material divulgativo específico sobre la gestión de la recarga de acuíferos y creando estrategias de actuación.

CONTACTO

Para más información contactar con:

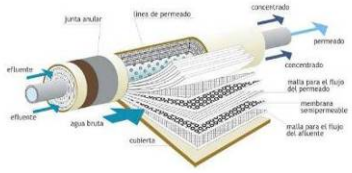
Enrique Fernández Escalante
Tel. 913 226 106
dina-mar@tragsatec.es
www.dina-mar.es

TÉCNICAS ESPECIALES DE GESTION HÍDRICA DESALACIÓN, GESTIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS Y REUTILIZACIÓN. PROS Y CONTRAS

Desalación, recarga artificial de acuíferos y reutilización son las llamadas "técnicas especiales" de gestión hídrica y constituyen una alternativa o un complemento a las "técnicas convencionales" (embalses y trasvases). La principal ventaja de las técnicas especiales es que en general presentan mayores posibilidades de desarrollo sostenible. En su contra juegan principalmente el bajo conocimiento por parte de organismos e instituciones públicas y la escasa experiencia que existe en nuestro país sobre los pormenores de las mismas.

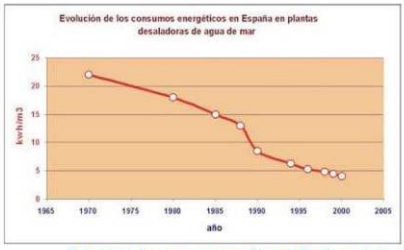
Desalación

Constituye una alternativa en las zonas costeras. En nuestro país existen en la actualidad más de 900 desaladoras, que producen más de 800.000 m³/día (Hispagua, 2006). Hay diversos procesos de desalación, siendo la ósmosis inversa el más rentable.



Dispositivo de Osmosis inversa

Las principales ventajas que ofrece son la posibilidad de utilizar agua salobre de los acuíferos, frenando así la intrusión salina, la estabilidad del suministro tanto en cantidad como calidad y la posibilidad de adaptarse de manera rápida a la demanda, dentro de unos límites.



Evolución de los consumos energéticos en España en plantas desaladoras de agua de mar

El principal problema que presenta es el elevado coste energético (que supone un factor limitante para muchos usuarios) y la gestión de los residuos (salmueras). Según la Asociación Española de Desalación y Reutilización, el consumo energético medio en España durante el 2005 fue del orden de 3 Kwh/ m³ en agua de mar.

Una línea de investigación recientemente abierta es la desalación utilizando energías renovables

Desalinizadora eólica en Canarias

Gestión de la recarga artificial de acuíferos (MAR)

Gestión de la recarga de acuíferos o *Managed Aquifer Recharge (MAR)* consiste en un conjunto de técnicas que permiten actuar sobre la cantidad y calidad de las reservas de agua en los acuíferos mediante la intervención en las entradas y salidas de agua del sistema. Existen varios métodos que permiten actuar sobre acuíferos someros, intermedios y profundos.
Requiere un conocimiento detallado del quimismo del agua de recarga, del agua natural del acuífero y de la posible interacción entre ellas.

Las principales ventajas que ofrecen son la eliminación de contaminantes por filtración bioquímica y mecánica, reducción de pérdidas por evaporación, efecto barrera del agua de recarga ante otras de peor calidad y la posibilidad de regeneración de ecosistemas, el ahorro de espacio (el agua se almacena bajo la superficie) y en costes de distribución.

Imagen de la balsa y canal de recarga artificial del dispositivo de la Cubeta de Santiuste (Segovia)

Solo el acuífero Terciario Detrítico de Madrid tiene una capacidad de almacenamiento (unos 11.000 hm^3) que dobla la de todos los embalses de la cuenca del Tajo: 5.709 hm^3 (Hispagua, 2005).

El principal inconveniente que las técnicas de MAR presentan es la falta de conocimiento y difusión de estas técnicas y su escasa andadura en España.
Actualmente el Grupo Tragsa lleva a cabo una serie de ensayos piloto en Santiuste y Carracillo (Segovia) con resultados positivos, contribuyendo a desarrollar e implantar esta técnica en nuestro país. En el año hidrológico 2006/07 se han introducido 17 hm^3 en el acuífero de los Arenales mediante técnicas MAR.

Reutilización

La utilización sucesiva del recurso permite satisfacer más usos con el mismo volumen, incrementando la eficiencia del sistema. Conviene diferenciar entre reutilización directa, en la que el segundo uso se produce a continuación del primero; de la reutilización indirecta, en la que el segundo uso se produce después de transcurrido un tiempo, durante el cual el agua residual se ha diluido en el caudal de algún curso de agua.

Desaladora del Cangrejo T.M. Valverde –El Hierro – Canarias

En España existen en la actualidad más de 100 actuaciones de reutilización directa, siendo uno de los países más avanzados en este campo. La reutilización directa requiere una planificación previa y pretratamiento. El agua se transporta desde el primer punto de uso hasta el segundo por una conducción, sin ser vertida a ningún cauce, generalmente para uso industrial.

EDAR en Abrucena – Almería

En nuestro país la reutilización de aguas residuales permite atender una demanda de 230 hm^3/año (83% para riego, el resto se reparte entre usos recreativos, industriales, municipales, etc. (Libro Blanco del Agua 2000, MMA).

Los principales problemas a los que se enfrenta la reutilización son la inexistencia de una normativa específica que regule los criterios de calidad exigibles y los aspectos relativos a su gestión. En este sentido, el MMA ha presentado en Febrero de 2007 un proyecto de Real Decreto para regular la reutilización de aguas depuradas, que modificará parcialmente el Reglamento de Dominio Público Hidráulico, en consonancia con el RD 509/1996 del 15 de marzo. Normas aplicables al tratamiento de aguas residuales urbanas).

En cuanto a los aspectos económicos de las técnicas alternativas en España, a continuación se presentan algunos ratios de inversión calculados a partir de experiencias realizadas por el Grupo Tragsa (en CONAMA, 2006 y www.dina-mar.es). Cabe destacar que el precio de las técnicas "alternativas, y en especial la gestión de la recarga de acuíferos, presentan costes más bajos que las técnicas convencionales, además de un impacto ambiental menor.

RATIOS MEDIOS DE INVERSIÓN:	
Balsas	9,75 €/m^3
Presas	0,80 €/m^3
Desaladoras	0,45 a 0,90 €/m^3
Ratio dispositivo AR superficial	0,21 €/m^3
Ratio dispositivo AR profunda	0,08 €/m^3

Costes de algunos dispositivos MAR actualmente operativos en España	
Dispositivo AR superficial Santiuste (Segovia)	0,39 €/m^3 (Grupo Tragsa, 2006)
Dispositivo AR superficial Carracillo (Segovia)	0,15 €/m^3 (Grupo Tragsa, 2007)
Dispositivos AGBAR- Barcelona (Cornellà)	0,04 a 0,08 €/m^3 (Fuente: AGBAR)

CONTACTO
Para más información contactar con:
Enrique Fernández Escalante
Tel. +34 91 3 226 106
dina-mar@tragsatec.es
www.dina-mar.es

LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS Y LA REGENERACIÓN HÍDRICA DE ZONAS HÚMEDAS DEGRADADAS

La situación de los humedales en España había alcanzado un estado crítico a lo largo del siglo XX, ya que su extensión se había reducido en un 60% (MOPTMA, 1990 y 1995, Casado y Montes, 1995). Además la mayoría se encontraba en un estado bastante modificado.

Ejemplos de humedales regenerados mediante técnicas de recarga artificial de acuíferos en Bolivar, Adelaida (Sur Australia), Phoenix, Arizona (USA) y Spandau, Berlín (Alemania)

Las principales causas han sido la sobreexplotación de acuíferos, la repoblación forestal y la creciente urbanización.

Desde que España ratificara en 1982 el Convenio Internacional RAMSAR (1971), y ayudado por la Ley 4/1989 de Conservación de los Espacios Naturales y de la Flora y Fauna Silvestre, se ha fomentado la conservación de los humedales mediante diversas técnicas, entre las que cabe destacar la recarga artificial de acuíferos.

Este sistema se viene aplicando en otros países desde hace décadas, como muestran los ejemplos de Adelaida, Arizona y Berlín, en general mediante recarga artificial inducida.

Laguna de la Iglesia (SG-1), catalogada de interés especial por la Junta de Castilla y León

Fotografías de 2004 y de 2007 tras dos años de regeneración hídrica mediante operaciones de recarga artificial de acuíferos

La necesidad de recuperación queda justificada por el gran valor ambiental que presentan las zonas húmedas y su elevada biodiversidad. Sirven como sumideros de carbono, estabilizan el clima, regulan el ciclo hidrogeológico y los ciclos hidrogeoquímicos, tienen capacidad depuradora y moderan el efecto de las inundaciones. Además una gran parte presenta gran hidrodependencia con los acuíferos, incidiendo en su nivel freático.

Los humedales ofrecen beneficios, además de brindar valores a través de sus recursos, como son: Agua, madera, fibras, peces, crustáceos, suelos muy productivos, plantas medicinales, vida silvestre, etc.

Además estas zonas pueden servir como medio de transporte y como imanes para atraer el turismo.

Para la salud humana cabe destacar la provisión de alimentos, al ser ecosistemas de gran productividad; y de productos farmacéuticos, al poseer el agua y los lodos propiedades medicinales. También funcionan como filtros o trampas para algunos microorganismos patógenos. Además aportan bienestar mental, ocio y cultura, lo que les confiere un alto valor contingente.

Restauración de humedales mediante la gestión de su recarga en España

En España ha habido escasas experiencias de regeneración hídrica de humedales. Entre ellas podemos citar las llevadas a cabo en el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel desde la década de los ochenta. La salvaguarda del humedal ha sido posible gracias a la recarga artificial desde ocho sondeos, que ha permitido su supervivencia en un acuífero declarado sobreexplotado.
En el acuífero de los Arenales, en 2004, se iniciaron labores de regeneración hídrica de humedales del Complejo Coca-

Las Tablas de Daimiel han contado con ocho sondeos para su regeneración mediante gestión de la recarga desde los años 80

Olmedo (Laguna de la Iglesia y de las Eras), en Segovia, Valladolid, con aguas del dispositivo de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste.

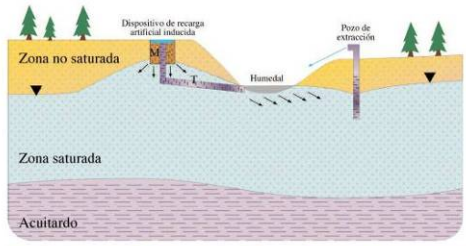
Así mismo en la comarca del Carracillo se está regenerando la Laguna del Señor, con aguas de recarga artificial.

El proceso, todavía incipiente, presenta muchas más ventajas que inconvenientes, según denotan los indicadores de seguimiento. Por ejemplo, se ha conseguido preservar bacterias halófilas endémicas en este Complejo.

Todos estos ejemplos han contado con la activa participación de la empresa pública Tragsa.

Para conseguir una adecuada regeneración hídrica, se necesita simular el flujo subterráneo natural, y así conseguir una trayectoria artificial parecida. Es preciso estudiar la solubilidad de los materiales y el paso del agua a través del acuífero y los procesos de interacción.

Laguna del Señor en Gomezserracín, comarca del Carracillo, Segovia



Diseño genérico de un dispositivo de recarga artificial inducida para aumentar la salinidad de las aguas de recarga artificial hasta alcanzar unas características similares a las aguas de la zona. Se regula la superficie de contacto y el tiempo de interacción con el material salino natural del terreno, precipitado por el ascenso de flujos subterráneos profundos

Resultados de las experiencias

Analizando los resultados obtenidos al aplicar la recarga artificial inducida, se puede decir, que el estado ecológico ha mejorado, ya que se ha conseguido que el agua de recarga artificial se asemeje químicamente a las aguas originales de las lagunas. Para que esta calidad se mantenga sería aconsejable que se aplique alguna figura de protección.

Para apreciar los cambios se ha diseñado un sistema de indicadores ambientales, relativos a la identificación de impactos, al estudio de la temporalidad y a la intervención y actuación llevadas a cabo. Cabe destacar los siguientes impactos positivos.

- Mejora de la gestión de los recursos
- Reducción de los descensos del nivel del agua producidos por el bombeo
- Mejora cualitativa de las agua
- Depuración de vectores patógenos

En definitiva, la aplicación de estas técnicas requiere estudios técnicos de gran detalle, con su consecuente coste económico, lo que constituye una buena inversión vistos los beneficios generados.

Estas actuaciones deben buscar la coherencia ecológica, paisajística, territorial, social e institucional.

CONTACTO

Para más información contactar con:
Enrique Fernández Escalante
Tel. +34 913 226 106
dina-mar@tragsatec.es
www.dina-mar.es

LAS TÉCNICAS PALIATIVAS EN LA GESTIÓN HÍDRICA INTEGRAL.
EL CASO DE LA RECARGA ARTIFICIAL EN CUENCAS FORESTALES Y TÉCNICAS DE GESTIÓN DE MASAS VEGETALES PARA LA PRODUCCIÓN DE AGUA

Antecedentes

Hay un grupo de técnicas de gestión hídrica poco conocidas denominadas "paliativas" (contribuyan a paliar los picos en la demanda), pero de enorme importancia para la gestión progresiva del agua, desde la cabecera de cada cuenca. Generalmente se trata de diques e infraestructuras que laminan la escorrentía y retienen importantes volúmenes que, de otro modo, se concentrarían en la parte baja de las cuencas; así como la adecuada gestión de las masas forestales. De ahí la importancia de la labor de los ingenieros de montes y forestales en la gestión de los recursos hídricos y en la gestión de la recarga de los acuíferos (MAR).

Se trata de una solución especialmente diseñada para las subcuencas del arco Mediterráneo, donde las inundaciones son un fenómeno habitual.

El elemento más efectivo son los elementos introducidos y la gestión forestal, cuya combinación permite recargar los acuíferos y disminuir el caudal de concentración. En su construcción el Grupo Tragsa tiene una consolidada experiencia, en especial en el ámbito de la comunidad Valenciana y Andalucía.

Según estudios realizados en el marco del proyecto DINA-MAR, la recarga de los acuíferos situados bajo bosques es superior a la habida en zonas yermas con precipitaciones similares. El hecho no parece atribuible a elementos "del hombre", parece más bien un mecanismo natural.

Gestión del agua de escorrentía

Cuando el terreno se satura y no retiene el agua de lluvia, ésta se mueve a favor de la gravedad hacia los cauces, y puede alcanzar efectos catastróficos.

Una adecuada gestión del monte puede retener gran parte de esta agua en los acuíferos. Algunos ejemplos son:

1.- Repoblaciones y selvicultura para la recarga artificial en profundidad en zonas proclives.

- Creación de masas con diversidad de especies adaptadas a las condiciones del suelo, con bajo consumo de agua y varios estratos que favorezcan la infiltración.

2.- Preparación mecanizada del suelo para favorecer la infiltración.

Para zonas forestales sobre acuíferos susceptibles de recarga artificial:

- Crear surcos que favorezcan la infiltración y disminuyan la escorrentía superficial.
- Facilitar la implantación y desarrollo de las plantas.

La realización de surcos o zanjas de contorno reducen la erosión hídrica y aumentan el tiempo de permanencia del agua en la ladera, favoreciendo la infiltración natural, la recarga de los acuíferos y el desarrollo de la plantación. (Foto TRAGSATEC).

3.- Montes ordenados para la recarga de acuíferos.

Técnica aplicada en Suiza con buenos resultados. Consiste en desviar parte de las aguas de un río hacia el interior de un bosque ordenado para la recarga, mediante especies adecuadas y determinadas labores en el suelo.

4.- Restauración y mantenimiento de bancales.

Los bancales son estructuras que favorecen el cultivo en las laderas. Usados desde antiguo, han permitido al hombre extender sus áreas cultivadas y contribuido a la recarga de los acuíferos. Su alto grado de abandono puede paliarse mediante su repoblación forestal.

Avenida catastrófica en una población del sureste español (años 60). Este episodio torrencial afectó a todo el sudeste, generó pérdidas humanas y materiales y llevó al mar hectómetros cúbicos de agua, paradójicamente en una zona con problemas endémicos de sequía. (Fotografía por cortesía del ICONA).

Ladera abancalada. Gran cantidad de estas obras de corrección están hoy día abandonadas. Su mantenimiento y repoblación forestal facilitan el aprovechamiento de las aguas de escorrentía. Morella (Castellón). (Foto TRAGSATEC).

5.- Aprovechamiento de las aguas de escorrentía.

Una de las actuaciones más utilizadas en los trabajos de corrección hidrológico-forestal es la ejecución de diques y albarradas en los barrancos y cauces. Dichas obras, si bien se construyen normalmente con otros fines (laminación, retenida, consolidación), suelen servir también como infraestructuras para infiltrar las aguas.

Dique en un torrente de Sierra Nevada (Granada). Lamina el caudal punta y aumenta la infiltración (Foto TRAGSATEC).

El inconveniente principal son los sedimentos en suspensión, que colmatan el suelo disminuyendo la tasa de infiltración. Este problema se reduce con la reforestación de la cuenca vertiente y la instalación de diques en serie, que prolongan su vida útil.

Dique en el torrente Salado (Lanjarón, Granada) durante su construcción en los años 50 (foto por cortesía del ICONA) y en la actualidad (Foto TRAGSATEC). La presencia del dique ha favorecido el desarrollo de un ecosistema muy valioso.

Además generan un efecto positivo sobre la vegetación, permitiendo el desarrollo de un ecosistema diverso y valioso.

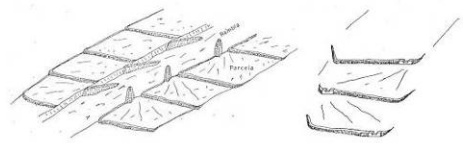
Otras obras para la gestión de las aguas de escorrentía son:

- Recogida de agua por impermeabilización de superficies, que son desviadas hacia depósitos de almacenamiento (como los empleados en los incendios forestales).

Zanja de drenaje en una ladera. La recolección del agua de lluvia, reduce la erosión y permite un mayor aprovechamiento de la escorrentía. Navarra. (Foto TRAGSATEC).

Pequeña presa para embalsar agua, en Cabañeros. (Foto TRAGSATEC).

- Pequeñas presas en cauces fluviales, a modo de pequeños embalses de laminación e infiltración.
- Balsas de recogida de agua a pie de ladera.
- Boqueras: Son unos largos caballones que derivan parte del caudal durante una avenida y lo conducen hacia las parcelas de cultivos. Su uso es muy común en las ramblas



Croquis de boqueras en una rambla y de atochadas. Las líneas marcan el recorrido de las aguas (Tomados de Ecología Fuera de Serie. ICONA. 1990).

y constituyen uno de los elementos más antiguos de España para la recarga artificial.

- Atochadas: Consisten en represar el agua de escorrentía por medio de caballones de tierra, transversales a la vaguada, y que disponen de aliviaderos laterales.

Además, las formaciones boscosas y su correcta gestión ejercen otra serie de influencias positivas sobre las aguas, tanto subterráneas como superficiales, tales como:

- Mayor aumento de la calidad de las aguas, lo que a su vez supone menores costes de depuración y mayor garantía sanitaria.
- Conservación de ecosistemas húmedos, con su beneficio ecológico, conservación de la biodiversidad, impedimento a la intrusión marina y otros problemas de contaminación, mantenimiento del paisaje, y, por ende, un mayor valor recreativo y cultural.

Conclusiones

El control de la escorrentía y la gestión de las aguas turbias se han consolidado como medidas de gestión hídrica paliativas.

Las infraestructuras en las cuencas forestales y a lo largo de los cauces, así como la reforestación de áreas de recarga y su gestión adecuada, suponen un incremento en la cantidad de agua subterránea que recarga los acuíferos y en la disponibilidad hídrica en la zona afectada. Además de esto, la gestión forestal genera otros efectos positivos en la calidad ambiental.

Contacto
Carlos Copano
Tel. +34 913 226 200
dina-mar@tragsa.es
www.dina-mar.es

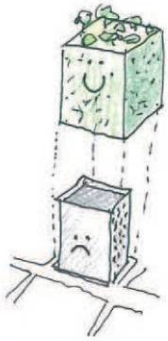
LA GESTIÓN DE RECARGA DE ACUÍFEROS EN HIDROGEOLOGÍA URBANA.

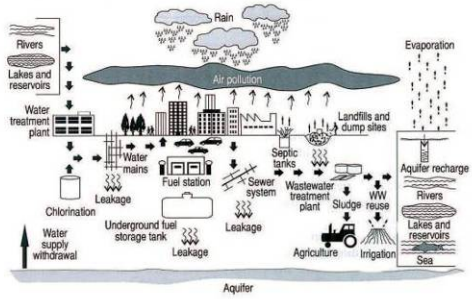
SUDS: SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE

Definición

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible son sistemas que recuperan el ciclo natural del agua en la ciudad.

Ciudad impermeable.

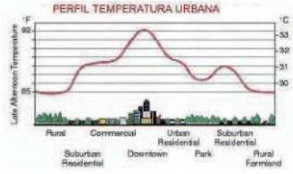


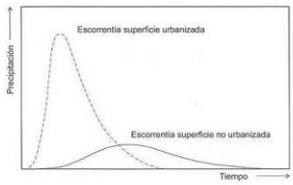


Ciclo urbano del agua.

Problemática

La implantación de edificaciones y urbanizaciones suponen un impacto negativo en el territorio. La progresiva impermeabilización del terreno provoca profundas alteraciones hidrológicas y supone grandes inversiones en infraestructuras de canalización y depuración del agua recogida.





El ciclo natural del agua consta de varias fases: evaporación, condensación, precipitación e infiltración. Todas ellas son de vital importancia para que el agua mantenga los niveles de vida estables y permita el desarrollo de un territorio sano. El ciclo urbano del agua, por su parte, ha abandonado las trazas originales del lugar y provoca problemas económicos y medioambientales de difícil solución:

Efecto Isla de calor:

La impermeabilización de las superficies urbanas: viales, aceras, aparcamientos, cubiertas,... provoca un incremento de la temperatura de hasta 6 ºC en el centro de las ciudades.

Concentración de escorrentía:

Las superficies urbanas impermeables provocan una rápida concentración del agua precipitada en breves lapsos de tiempo, obteniéndose como resultado inundaciones y avenidas altamente contaminadas y difícilmente absorbibles por las redes urbanas de saneamiento y alcantarillado

Clasificación

Los sistemas urbanos de drenaje sostenible deben entenderse como componentes de una cadena de gestión y no como elementos aislados capaces de resolver el tratamiento del agua de modo individualizado.

Dicha cadena de Gestión comprende actuaciones de prevención, gestión en origen, gestión en el transporte y gestión en el tratamiento previo a la infiltración definitiva, y conduce a la siguiente clasificación:

SISTEMAS DE CONTROL EN ORIGEN

Evitan la escorrentía superficial y recuperan la capacidad de infiltración original.

Superficies permeables: Superficies que permiten el paso directo del agua al terreno

Pozos y zanjas de infiltración: perforaciones rellenas de material granular que recogen y almacenan el agua de escorrentía para su infiltración .

Depósitos de infiltración: depresiones del terreno vegetadas diseñadas para almacenar e infiltrar gradualmente la escorrentía generada en superficies contiguas.

Cubiertas vegetales: cubiertas de edificaciones con plantaciones y sustrato que retienen el agua.

Pavimento permeable.

Zanja filtrante.

Cubiertas vegetales.

Depósitos de infiltración.

SISTEMAS DE TRANSPORTE PERMEABLE

Transportan lentamente el agua de escorrentía permitiendo la filtración, el almacenamiento, la infiltración e incluso la evaporación y oxigenación.

Drenes filtrantes: zanjas recubiertas de material geotextil y rellenas de grava.

Cunetas verdes: canales vegetados con hierba, que conducen el agua de escorrentía desde las superficies de drenaje a un sistema de almacenaje o a una conexión con el alcantarillado existente.

Dren filtrante.

Cuneta verde.

SISTEMAS DE TRATAMIENTO PASIVO

Eliminar y descomponer los contaminantes del agua al final del proceso de tratamiento:

Franjas filtrantes: sección de terreno vegetado con leve inclinación diseñado para recibir y filtrar la lámina de escorrentía atrapando sólidos y aceites

Depósitos de detención: depresiones diseñadas para frenar durante unas horas la escorrentía de las tormentas y permitir la sedimentación de los sólidos en suspensión

Estanques de retención: depresiones del terreno con volumen de agua permanente

Humedales artificiales: amplias superficies de agua poco profundas y con vegetación propia de pantanos o humedales naturales.

Franja filtrante.

Humedal artificial.

Depósito de detención.

Estanque de retención.

MEDIDAS PREVENTIVAS

Destinadas a alcanzar buenas prácticas urbanas:

Minimizar la escorrentía superficial en la ciudad.

Drenar hacia zonas verdes en vez de derivar el agua a alcantarillado.

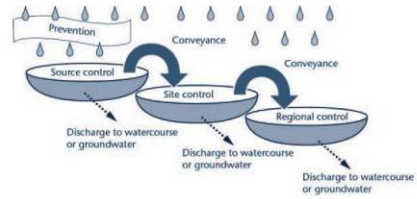
Recoger pluviales para uso posterior: riego, cisternas, lavadoras...

Mantener la ciudad limpia de modo periódico.

Concienciación de fuentes contaminantes: talleres, hospitales...

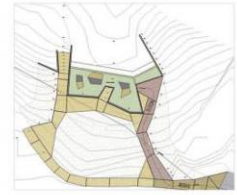
Minimizar el uso de herbicidas y fungicidas en parques.

Educación de los agentes implicados en el diseño y mantenimiento de la Ciudad.



Aplicaciones

El grupo Tragsa ha comenzado a implantar estas técnicas en los proyectos desarrollados, mejorando de este modo la calidad urbana medio-ambiental.



Contacto
Ignacio Prieto Leache
Arquitecto
Tel.+34 913225493 iprl@tragsa.es
www.dina-mar.es

OTROS MATERIALES DIVULGATIVOS. CALENDARIO DINA-MAR 2008. ANVERSOS Y REVERSOS CON MENSAJES CLAVE

Calendario 2008

DINA-MAR es un proyecto de I+D+i del Grupo Tragsa, cuyo principal objetivo es determinar qué zonas de España son susceptibles para operaciones de recarga artificial de acuíferos o gestión de la recarga de acuíferos (Managed Aquifer Recharge –MAR–), en el marco del desarrollo sostenible y bajo normas de mínimo impacto ambiental. Tras casi dos años de investigación, se aprecia que esta técnica es adecuada para la realidad hídrica española del siglo XXI.

Foto de anverso: Cabecera del dispositivo de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste (Segovia).

http://www.dina-mar.es

Una de las consecuencias del cambio climático será la alteración del régimen de precipitaciones, que conducirá a ciclos de sequía más frecuentes y prolongados. Es preciso prepararnos para gestionar de forma adecuada y solidaria estos períodos (CONAMA8), dando cabida a técnicas de gestión hídrica alternativas.

Foto de anverso: Detalle del dispositivo de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste (Segovia).

Enero

lunes	martes	miércoles	jueves	viernes	sábado	domingo
31	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31	1	2	3

http://www.dina-mar.es

«Managed Aquifer Recharge» (MAR), o Gestión de la Recarga de Acuíferos, es un método de gestión hídrica que permite introducir agua en acuíferos subterráneos. El origen del agua destinada a este fin puede ser muy diverso; en general, procede de ríos, si bien puede ser originaria de depuradoras, desaladoras, etc. Una vez almacenada en los acuíferos, puede ser extraída para distintos usos (abastecimiento, riego...), frenar la intrusión marina, reducir la contaminación de las aguas subterráneas, etc.

PERFIL TIPO DE UN DISPOSITIVO DE RECARGA ARTIFICIAL (CANAL) EN "CONTROL LATERAL" EN UNA ZONA REGABLE

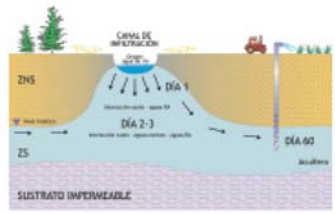


Foto de anverso: Laguna de la Iglesia, Coca (Segovia), en regeneración hídrica mediante labores de recarga artificial (AR).

http://www.dina-mar.es

dina-MAR Tragsa

En los últimos 20 años hemos duplicado en España el consumo de agua, cuando no somos el doble de habitantes. El 25% de este agua procede de los acuíferos subterráneos. Sólo el acuífero Terciario Detrítico de Madrid tiene una capacidad de almacenamiento (unos 11.000 hm^3) que dobla la de todos los embalses de la cuenca del Tajo: 5.709 hm^3 (Hispagua, 2005). Es preciso emplear todos los recursos a nuestro alcance para una gestión hídrica eficiente. Las técnicas alternativas (desalación, reciclaje y reutilización) se constituyen como alternativas sólidas ante las situaciones de sequía a corto plazo.

Foto de anverso: Arrozal inundado mediante técnicas de AR en la vega del Guadiana.

http://www.dina-mar.es

dina-MAR Tragsa

España es uno de los países que más agua consume. Cada español gasta una media de 400 litros de agua al día, una cantidad muy alta que nos sitúa en el tercer puesto mundial, y en el primer lugar de Europa. Si, además, tenemos en cuenta que el 60% del agua de riego se pierde antes de llegar a las plantas, y que las fugas en los sistemas de distribución de las ciudades oscilan entre un 20 y un 40%, según las zonas, nos podemos hacer una idea de la cantidad de agua que se pierde sin ser utilizada. Estos volúmenes podrían ser recuperados y utilizados en la recarga artificial de acuíferos, incrementando así las reservas hídricas.

Foto de anverso: Invernaderos en las Alpujarras.

http://www.dina-mar.es

dina-MAR Tragsa

Se han inventariado en toda Europa al menos 40 dispositivos y experiencias de tipo MAR, en un total de18 países. Por citar algunos ejemplos destacables, las ciudades de Dusseldorf y Budapest se abastecen en un 100% con aguas obtenidas mediante técnicas de gestión de recarga de acuíferos (MAR); Berlín depende de este tipo de aguas en un 75%.

Foto de anverso: Pozo de recarga artificial de AGBAR. Cornellá, Barcelona.

http://www.dina-mar.es

dina-MAR Tragsa

El Grupo Tragsa inició su actividad en operaciones de gestión de la recarga de acuíferos (MAR) en la década de los 90, planificando y ejecutando obras en zonas forestales de la cabecera de varias cuencas, especialmente mediante diques, caballones, etc. El primer dispositivo experimental de MAR mediante sondeos fue realizado en 1996, en la cuenca alta del Guadiana, introduciendo aguas en el acuífero 23 (UHG 04-04), en las inmediaciones de Alcázar de San Juan.

DISPOSITIVOS OPERATIVOS EN ESPAÑA

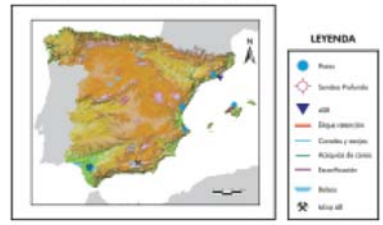


Foto de anverso: Els Poblets (Alicante). Valle con intensa tradición en AR.

http://www.dina-mar.es

En el marco del proyecto de I+D+i **DINA-MAR,** se han elaborado una serie de cartografías temáticas a nivel nacional, en las que figuran las zonas susceptibles de llevar a cabo labores de recarga artificial de acuíferos con alta viabilidad técnica y sin grandes inversiones. La superficie a recargar excede los 66.000 km², siendo la cuenca del Duero la más proclive, con más de un 34% de su superficie, seguida por las del Tajo y el Ebro, con cerca de un 15%, considerando como única fuente las aguas de origen fluvial.

Foto de anverso: Sondeos de ASR integrados en el paisaje de Arizona.

http://www.dina-mar.es

DISPOSITIVOS DE RECARGA ARTIFICIAL MÁS IMPORTANTES EN ESPAÑA

- En Cataluña predominan dispositivos de infiltración por pozos y sondeos en el aluvial de los ríos, así como la escarificación del lecho de los mismos, e incluso un sondeo de infiltración profunda. En el resto del arco mediterráneo e islas Baleares predominan los pozos, galerías y balsas de infiltración, con abundantes diques de retención y boqueras.
- En la Meseta predominan los dispositivos de recarga artificial superficial por canales y zanjas (Segovia), además de una serie de instalaciones con pozos en el aluvial de ríos (Valladolid, La Rioja, etc.).
- En Madrid y Castilla-La Mancha las experiencias más notables se han realizado mediante sondeos profundos.
- En Andalucía Central hay sistemas de acequias (careos), drenajes de minas y sondeos; mientras que en la Occidental predominan los pozos y balsas como dispositivos de infiltración inducida (**DINA-MAR**).

Foto de anverso: El agua almacenada en el acuífero durante el invierno es empleada para el riego en el período estival. Cubeta de Santiuste (Segovia).

http://www.dina-mar.es

En nuestro país la reutilización de aguas residuales permite atender una demanda de 230 hm^3/año (83% para riego; el resto se reparte entre usos recreativos, industriales, municipales, etc.) (Libro Blanco del Agua 2000, MMA). Los principales problemas a los que se enfrenta la reutilización son su escaso bagaje y la inexistencia de una normativa específica que regule los criterios de calidad exigibles, así como los aspectos relativos a su gestión en nuestro país (hasta octubre de 2007 no ha aparecido el primer borrador que regula parcialmente los estándares de calidad para aguas de recarga artificial).

Foto de anverso: Sondeo de inyección y extracción profunda o ASR en Adelaida (Australia).

http://www.dina-mar.es

El Grupo Tragsa ha llevado a cabo el proyecto y construcción de dos dispositivos de MAR para regadío en la Cubeta de Santiuste y Carracillo (Segovia), promovidos y financiados por la Dirección General de Desarrollo Rural (MAPA) y la Junta de Castilla y León. Se trata de dispositivos que toman agua del río Voltoya, y Cega y Pirón, respectivamente, y, a través de una tubería hacen llegar el caudal derivado a un dispositivo superficial tipo canal, con más de 40 km lineales, con balsas intercaladas, que permiten la infiltración de aguas en el acuífero en invierno, y el riego con las mismas en verano. La ocupación del terreno es mínima frente a la superficie ocupada por embalses tradicionales, y los costes del agua son asumibles y descendentes a medida que se avanza en el conocimiento de la técnica. En el año hidrológico 2006/07 se han introducido cerca de 17 hm^3 en el acuífero de los Arenales mediante técnicas MAR.

Foto de anverso: Recarga artificial mediante canales en Segovia.

http://www.dina-mar.es

Los careos son unas antiguas acequias de origen árabe ubicadas en las Alpujarras, que, aprovechando el deshielo de Sierra Nevada, recargan los acuíferos situados en las zonas regables de su falda sur. Tienen más de 125 km lineales. El Grupo Tragsa ha inventariado y colaborado con el Parque Nacional de Sierra Nevada en la reconstrucción de 14 acequias o simas de careo o guiadero con materiales tradicionales, manteniendo así un patrimonio cultural sin perder su originalidad.

Foto de anverso: Acequia de careo en Mecina-Bombarón (Granada)

http://www.dina-mar.es

La divulgación y la educación ambiental juegan un papel estratégico muy importante para acercar la reutilización, y, en concreto, la recarga artificial de acuíferos a la población. El grado de conocimiento de la técnica es bastante bajo en la actualidad, al haber adquirido mayor popularidad los trasvases, y en menor medida, la desalación y la reutilización como principales métodos de gestión hídrica, si bien, las expectativas para la gestión de la recarga de acuíferos son esperanzadoras.

Foto de anverso: Recarga artificial superficial mediante canales en Segovia.

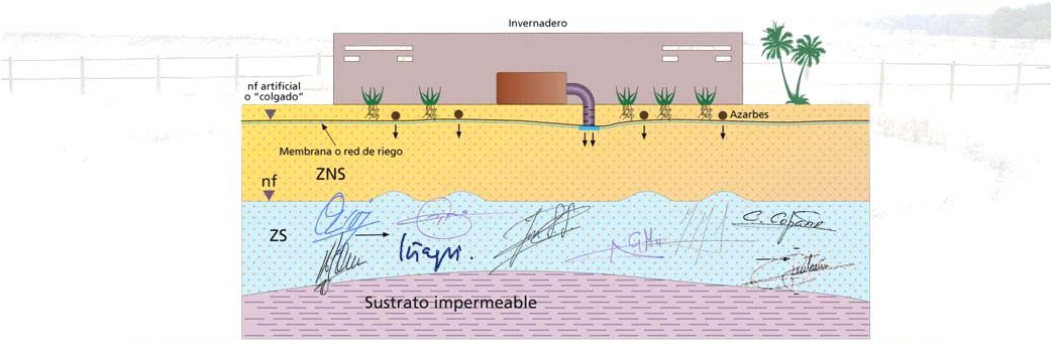
http://www.dina-mar.es

OTROS MATERIALES DIVULGATIVOS.
LOS CRIS-MARS 2009 Y 2010. ANVERSOS Y REVERSOS

EL CRIS-MAR

EL EQUIPO DE I+D+i DEL PROYECTO DINA-MAR OS DESEA FELICES PASCUAS Y UN FELIZ 2010

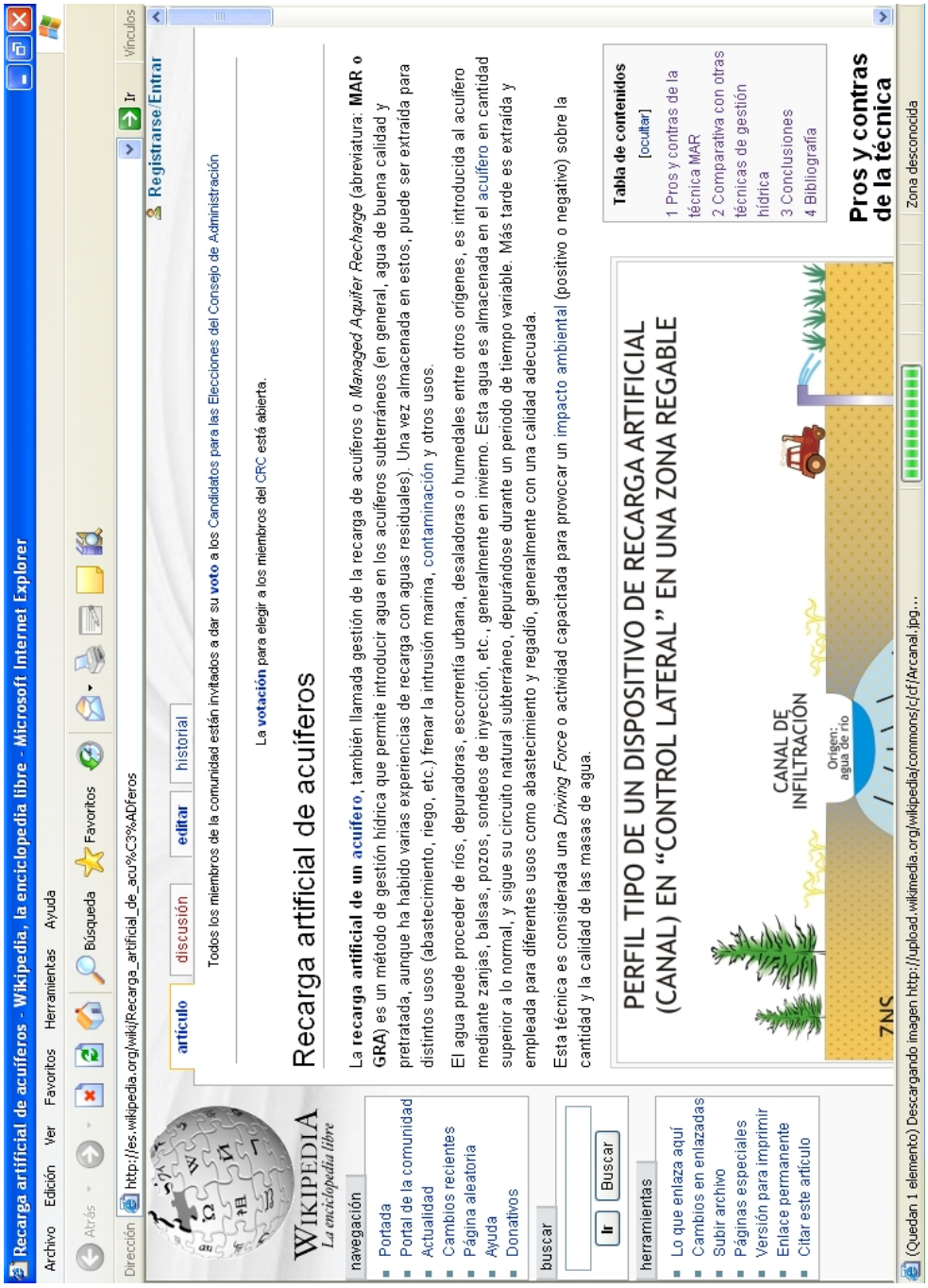
RIEGO SUBTERRÁNEO (NIVEL FREÁTICO ARTIFICIAL)



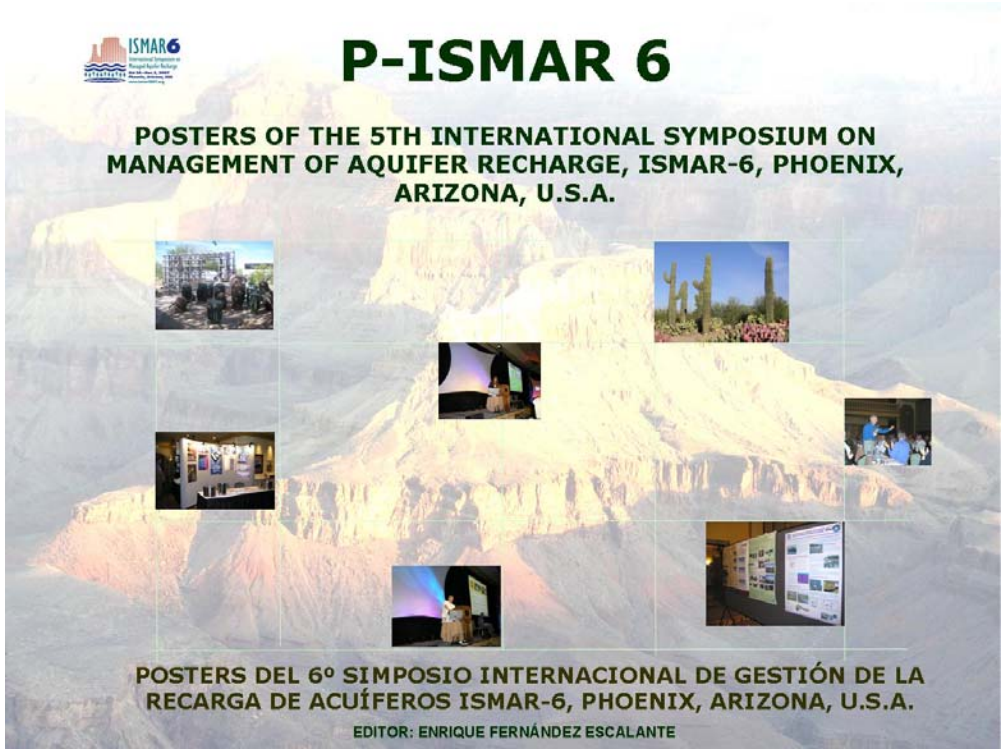
DINA-MAR i+R&D TEAM WISH YOU A MERRY CHRISTMAS AND A HAPPY 2010

http://www.dina-mar.es/

OTROS MATERIALES DIVULGATIVOS. CONTRIBUCIÓN EN LA WIKIPEDIA



OTROS MATERIALES DIVULGATIVOS. COORDINACIÓN DE LAS PUBLICACIONES P-ISMAR.


P-ISMAR 6
POSTERS OF THE 5TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MANAGEMENT OF AQUIFER RECHARGE, ISMAR-6, PHOENIX, ARIZONA, U.S.A.
POSTERS DEL 6º SIMPOSIO INTERNACIONAL DE GESTIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS ISMAR-6, PHOENIX, ARIZONA, U.S.A.
EDITOR: ENRIQUE FERNÁNDEZ ESCALANTE

P-ISMAR 7
POSTERS OF THE 7TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MANAGEMENT OF AQUIFER RECHARGE, ISMAR-7, ABU DHABI (UAE)
POSTERS DEL 7º SIMPOSIO INTERNACIONAL DE GESTIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS ISMAR-7, ABU DHABI (EAU)
EDITOR: ENRIQUE FERNÁNDEZ ESCALANTE

ANEXO 3. ASPECTO DE LOS PANELES COLOCADOS EN CAMPO PARA DIVULGACIÓN Y DOCENCIA (VISITAS GUIADAS)

LA GESTIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN ESPAÑA

La gestión de la Recarga de Acuíferos o "Managed Aquifer Recharge" (MAR), técnica antes conocida como "recarga artificial de acuíferos" (AR), permite introducir agua en los acuíferos mediante diferentes dispositivos.
El agua, de origen muy diverso, es almacenada en el acuífero y sigue su circuito natural subterráneo, depurándose durante un período de tiempo variable. Cuando hace falta es extraída y empleada para abastecimiento, regadío, etc.

Más información en http://www.dina-mar.es

Ventajas

- Almacenar agua en los acuíferos, especialmente en zonas con poca disponibilidad de terreno en superficie.
- Eliminación de patógenos y sustancias químicas durante la infiltración.
- Utilización del acuífero como embalse regulador y red de distribución.
- Reducir las pérdidas por evaporación.
- Mejora económica de zonas deprimidas y alivian conflictos por el agua.
- Alivio de la desertización, del cambio climático, de la erosión de suelos, etc.

Cabecera del dispositivo de AR. Balsa de decantación de la que parten ambos canales.

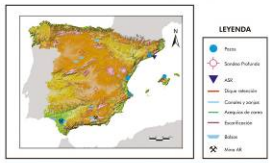
Inconvenientes

- Bajo grado de conocimiento de su potencial en España.
- Escasez y falta de continuidad en las experiencias.
- Escasa dedicación en las publicaciones de gestión hídrica del país hasta la fecha.
- La necesidad de estudios previos de viabilidad e idoneidad encarece costes.
- Son precisos Estudios de Impacto Ambiental y proyectos para minimizar los riesgos e impactos, así como un adecuado control durante el diseño y construcción.

Detalle de uno de los canales por los que el agua se infiltra y se distribuye. Uno de los usos que se le puede dar a la AR es utilizarla para el riego de cultivos.

UTILIDADES DE LA TÉCNICA MAR EN ESPAÑA

La gestión de la recarga artificial de acuíferos es considerada una técnica "especial" o "alternativa". En nuestro país la mayoría de las experiencias tienen un carácter experimental. Se ha hecho un inventario de hasta 28 experiencias y dispositivos en España:



Distribución en España de los diferentes dispositivos operativos de la Gestión de Recarga de Acuíferos.

HISTORIA DE LA TÉCNICA MAR EN SANTIUSTE

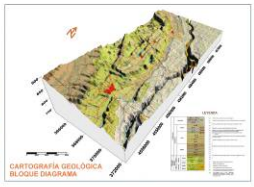
Los dispositivos de recarga artificial fueron construidos por el Ministerio de Agricultura (actual MARM) y la Junta de Castilla y León en la Cubeta de Santiuste y Carracillo (Segovia). Su gestión fue cedida a la comunidad de regantes. Durante los seis años de operatividad se ha llevado a cabo un seguimiento, lo que ha permitido mejorar los dispositivos para aumentar su efectividad.

Geología de la zona

La Cubeta de Santiuste es un acuífero con una superficie aproximada de 42 Km².
La unidad Arévalo, constituida por depósitos arenosos, constituye el almacén principal. Presenta depósitos eólicos de origen fluvial y varios sistemas lagunares fosilizados.

Situación geográfica del acuífero de Los Arenales y su posición dentro de España.

Entorno de la zona de estudio.



Los principales relieves coinciden en gran medida con los afloramientos de facies terciarias, así como la presencia de depósitos de piedemonte en la margen oeste del arroyo de la Ermita. Además hay terrazas fluviales en las márgenes de los ríos Voltoya y Eresma.

Bloque diagrama del MDT de la zona de estudio con una capa raster sobrepuesta correspondiente al mapa geológico revisado.

DESCRIPCIÓN DE LA OBRA

El dispositivo de Santiuste está basado en la construcción de un pequeño embalse en el río Voltoya. Desde aquí una tubería enterrada de 10 Km lleva al depósito-cabecera del dispositivo. A continuación hay una balsa de decantación, de la que parten los dos canales o caceras principales.

Detalle de una "pantalla" prefabricada de hormigón que posee el canal, con objeto de incrementar la infiltración.

El "Caz Viejo", que comenzó a funcionar en 2002 por el este, tiene 10.667 metros de longitud. La superficie de infiltración ronda los 33.300 m². El canal tiene 64 dispositivos de parada para incrementar la infiltración.
El "Caz Nuevo", operativo desde 2005, discurre semiparalelo del anterior al oeste. Tiene 17.293 m. Está ubicado en el sector de máximos espesores del acuífero. En una última etapa fue ampliado a 27.960 m.

Obras de ampliación del canal en 2007.

Perfiles hidrogeológicos a lo largo de los canales de recarga artificial, expresando el espesor del acuífero en cada tramo y la posición de los niveles freáticos para el último ciclo 2007/08, antes y después de la AR.

El caudal procedente del río Voltoya ronda los 0,5 m³/s, con un periodo de concesión del primero de noviembre al último día de abril, concesión dependiente del año hidrológico.
Entre 2004 y 2005 fueron construidas seis balsas de infiltración, la de cabecera de decantación, la de la depuradora y dos humedales artificiales en el Sanchón.

Con todo esto se ha conseguido una mayor disponibilidad de agua en la zona para regadíos y una mejor calidad de las aguas.

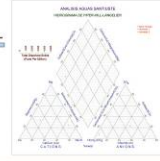
RESULTADOS OBTENIDOS DE LA EXPERIENCIA DE LA CUBETA DE SANTIUSTE

En las gráficas se sintetizan los principales cálculos llevados a cabo en estos seis ciclos de seguimiento:

Histogramas con la representación del ratio entre el volumen derivado para AR y el realmente infiltrado en el acuífero en los seis ciclos de AR. Volúmenes totales (en la primera gráfica) y porcentaje (en la segunda gráfica).

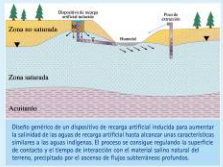
Observamos una tendencia creciente, mientras el agua se va infiltrando en el acuífero y los poros de la zona no saturada (ZNS) van acumulando aire (efecto Lisse). Después, decrece la tasa de infiltración hasta la desaturación.

Diagrama de PIPER-HILL-LANDELIER para una muestra del agua de recarga artificial y de los humedales regenerados.



APLICACIÓN DE LA TÉCNICA MAR A LA REGENERACIÓN DE HUMEDALES

La gestión de la recarga artificial es una técnica de gestión hídrica de alto potencial, entre sus posibles aplicaciones se encuentra la regeneración hídrica de zonas húmedas.
En España ha habido escasas actuaciones de este tipo, entre ellas, el vertido de aguas procedentes de sondeos a las Tablas de Daimiel, y, ahora, la regeneración hídrica de los humedales de La Iglesia y Las Eras en Villagonzalo (Segovia), a partir del canal de recarga artificial superficial de la Cubeta de Santiuste. También La Laguna del Señor, en el Carracillo.



Diseño genérico de un dispositivo de recarga artificial inducida para aumentar la calmidad de las aguas de recarga artificial hasta alcanzar unas características similares a las aguas indígenas. El proceso se consigue regulando la superficie de contacto y el tiempo de interacción con el material salino natural del terreno, precipitado por el ascenso de flujos subterráneos profundos.

Trazado del dispositivo de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste sobre la cartografía de isopacas con escala gráfica.

Humedal antes y después de la actuación de recarga artificial de acuíferos, aplicada a la regeneración de zonas húmedas. Laguna de la Iglesia (2004 y 2007)

CONCLUSIONES

- El monitoreo de los dispositivos permite conocer mejor las ventajas de esta técnica.
- La colmatación es el principal inconveniente de los dispositivos de AR, ya que reduce la tasa de infiltración. También la entrada de aire y la calidad de las aguas.
- Para combatir la colmatación, y la entrada de aire al acuífero hay más de 100 técnicas de Tratamiento Suelo y Acuífero (SAT), tales como el pretratamiento de las aguas, recargar a velocidades bajas, minimizar la oxigenación de las aguas, etc. Se aprecia que aumenta la tasa de infiltración al aplicar medidas concretas.
- Estudios del coste económico permiten decir que la Técnica MAR, al menos en este caso, puede ser considerada "barata" frente a otras técnicas de gestión hídrica.

Dispositivo de recarga artificial utilizado en la regeneración de La Laguna de la Iglesia (Segovia).

Agradecimientos

Al Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, la Junta de Castilla y León y especialmente a Ramón Galán, director de las obras de MAR en Santiuste y Carracillo por parte de la Secretaría General de Desarrollo Rural del MARM. También a las Comunidades de regantes de Santiuste y Carracillo.
El seguimiento del sistema en línea a cabo en el marco del proyecto de I+D+i DINA-MAR del Grupo Tragsa (código 3010.050.)

“CAMINITOS DE AGUA”. TRES RUTAS HIDROGEOLÓGICAS EN LA PROVINCIA DE SEGOVIA. ITINERARIO. Por Enrique Fernández Escalante.

Una de las actividades de divulgación y transferencia de tecnología más atractiva ha sido la propuesta de tres rutas hidrogeológicas en la provincia de Segovia, donde se ubican los “laboratorios experimentales” donde se han realizado ensayos y estudiado procesos en DINA-MAR.

La propuesta está bien documentada mediante una “Guía Itinerario”, de descarga libre a través desde la página Web del proyecto; y una “Guía de Interpretación”, bastante más voluminosa y de carácter técnico. Ambas referencias se encuentran en la bibliografía y cuentan con un resumen traducido al inglés. Así mismo ha sido traducido al inglés el panel que resume y complementa las guías (figura 9-13) que también es accesible vía Internet.

“Caminitos de agua” o “The Three Water Ways” se plantea como un conjunto de “rutas hidrogeológicas” con opción para visitar tres zonas de gran interés hidrogeológico y medioambiental en la provincia de Segovia, La Cubeta de Santiuste, El Carracillo y el qanat de Carbonero el Mayor.

En la actualidad no hay acuñada ninguna “ruta hidrogeológica” como tal en nuestra legislación, sirva por tanto como un intento de ampliar los Lugares de Interés Geológico o iniciar el proceso para instaurar ese término, con objeto de dar a la hidrogeología la importancia que merece.

La idea de crear la primera de las tres "rutas hidrogeológicas" en la Cubeta de Santiuste (Santiuste-Coca, Segovia) surgió al darnos cuenta de que, en un espacio de unos 12 km lineales, hay al menos 10 puntos de interés hidrogeológico visitables. Más tarde se incorporaron dos nuevos “caminitos de agua”, un qanat o galería para captación de aguas y recarga artificial en Carbonero el Mayor; y cuatro puntos de interés relacionados con el dispositivo de recarga artificial de la comarca del Carracillo, también en Segovia. Los tres sectores distan menos de 40 km en total.

El “visitante” interesado puede ser el excursionista al que le guste el campo, si bien, da gran cabida a visitas técnicas de estudiantes: Facultades, Escuelas de Ingeniería, máster de hidrogeología, medioambiente, etc.

La zona cuenta con la ventaja de tener una buena disposición por parte de sus agricultores, quienes han colaborado a gestar las rutas y a incrementar el interés hidrogeológico de la zona, y por ende, de la técnica de la recarga artificial de acuíferos.

La excursión presenta varias opciones, dependiendo de la duración prevista y del tiempo disponible, desde una jornada hasta varios días. La visita de todos los puntos requiere, al menos, tres días a un ritmo desenfadado.

Los puntos seleccionados cuentan con una amplia diversidad: Espacios Naturales Protegidos, infraestructuras hidráulicas, "curiosidades hidrogeológicas", nodos de esquemas de gestión hídrica, patrimonio histórico, etc.

La entidad propia de las zonas y su complejidad hidrogeológica permite además plantear ejercicios de interpretación, problemas con varias soluciones que requieren un esfuerzo interpretativo, dada la alta componente en educación ambiental con que han sido diseñados los paneles, el presente itinerario, y especialmente, la guía de interpretación.

En las guías mencionadas aparece una breve descripción general del entorno y de los mismos, reseñas para su acceso, localización e incluso coordenadas incorporadas a un fichero para cualquier GPS que puede ser descargado de la página Web, lo que facilita los accesos en campo, dotando a la actividad de un carácter de "visita autoguiada".

En cada "parada" se describe el tipo de acceso viable (autobús, turismo, todoterreno o incluso andando) y el material preciso en caso de proponer ejercicios y llevar a cabo tareas de interpretación. Se ha añadido además una valoración de 1 a 5 (intentando evitar la subjetividad), en base a su grado de innovación (si se trata de un prototipo o de una obra convencional) y por su singularidad o su interés hidrogeológico. Cada parada finaliza con un apartado para observaciones adicionales.

La mejor época para visitar los "caminitos de agua" es entre el 1 de noviembre y el 30 de abril, cuando los dispositivos de recarga artificial están operativos.

Es recomendable atender al material recomendable y, en ocasiones, tramitar los permisos oportunos con antelación.

A continuación se presenta una reproducción del panel que resume los distintos itinerarios, cuyo original se encuentra en la parada s-02. El fichero de imagen de dicho panel (versión para imprimir) es accesible por Internet a través de la página www.dina-mar.es,.

La visita a los caminitos puede ser complementada con la cartografía topográfica o geológica oportuna: Hojas a escala 1:50.000 n^{os} 428, 429, 455 y 456.

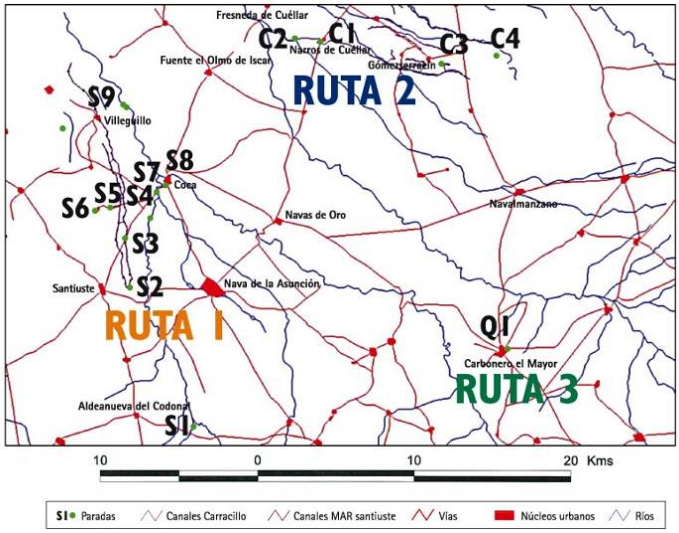


Figura 9-11. Cartografía esquemática del sector NO de Segovia y posición de las rutas hidrogeológicas propuestas y sus paradas (orientado al norte y con escala gráfica).

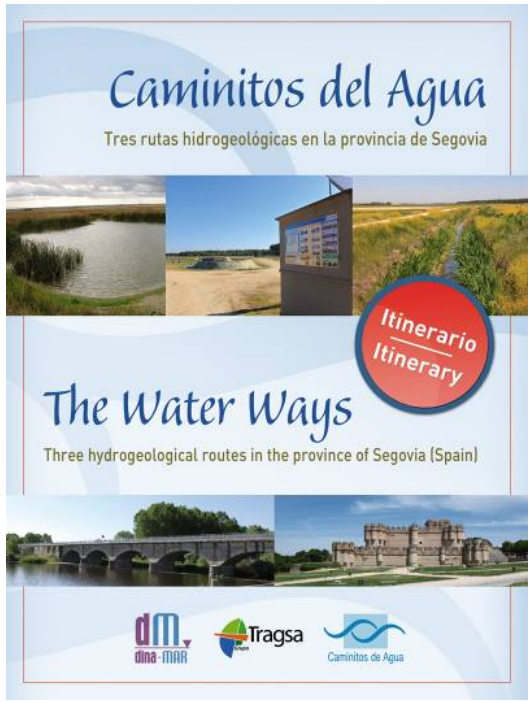


Figura 9-12. Portada de la “Guía Itinerario”, accesible por Internet.

Figura 9-13. Panel de la “Guía Itinerario”, accesible por Internet (página siguiente).

Caminitos de Agua, TRES RUTAS HIDROGEOLÓGICAS EN LA PROVINCIA DE SEGOVIA
Ruta Hidrogeológica de la Cubeta de Santiuste
Ruta Hidrogeológica del Carracillo
Ruta Hidrogeológica en Carbonero el Mayor. Qanat, Galería o Mina

BIBLIOGRAFÍA

- Fernández Escalante, A.E. (2005). "Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales. Aspectos cualitativos y medioambientales. Criterios técnicos derivados de la experiencia en la Cubeta de Santiuste (Segovia)". Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Enero de 2005. Texto completo disponible en la URL Oficial de la UCM: http://eprints.ucm.es/7154/.
- Fernández Escalante, A.E. (2010). "Caminitos de Agua. The Water Ways. Itinerario. Grafinat. (En prensa).
- Fernández Escalante, A.E. (2010). "Caminitos de Agua. Tres rutas hidrogeológicas por la provincia de Segovia. Guía de interpretación. Serie Hidrogeología Hoy nº 5, Grafinat". (En prensa).
- Galán, R, Fdez Escalante, A.E. y Martínez, J. (2001). "Contribuciones al estudio hidrogeológico para la recarga artificial del acuífero de la Cubeta de Santiuste. (Segovia)." VII Simposio de hidrogeología, AEH, Murcia.
- Galán, R, López, F, Martínez, J, Macías, C, Galán, G. y Fdez. Escalante, A.E. (2001). "Recarga artificial del acuífero de los Arenales en la comarca de "El Carracillo" (Segovia). Soporte físico." VII Simposio de hidrogeología, AEH, Murcia.
- Hermosilla Pla, J. (2008). "Las galerías drenantes en España: Análisis y selección de qanat(s)". Pg. 179 a 186. Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino, 2008.
- IGN. Cartografía de España a escala 1:50.000. Hojas 1617, 1717, 1618 y 1718 (Olmedo, Navas de Oro, Arévalo y Nava de la Asunción, respectivamente).

CAPÍTULO 10. DINA-MAR. UN TRIENIO DE I+D+i

DINA-MAR. PROYECTO PARA LA GESTIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN EL MARCO DEL DESARROLLO SOSTENIBLE. LÍNEAS DE ACCIÓN Y RESULTADOS DE UN CUATRIENIO DE INVESTIGACIÓN. Por Enrique Fernández Escalante, Ignacio Prieto Leache, Mª Ángeles San Miguel Fraile, Carlos Copano González de Heredia y Jon San Sebastián Sauto.

Este capítulo se ha redactado como compendio de las principales líneas de acción. En él se presentan, además, algunos resultados técnicos. Algunos de ellos no quedan justificados en el propio texto y es preciso remitirse a las memorias de las distintas anualidades o a las reseñas específicas citadas.

INTRODUCCIÓN

Este artículo se ha orientado de cara a divulgar los resultados de dos proyectos de I+D+I pruridisciplinares realizados en el Grupo Tragsa, DINA-MAR and GIAE. Ambos se centran en el rol que desempeña la técnica de la gestión de la recarga de acuíferos en el marco de la gestión hídrica integral.

DINA-MAR (Deph Investigación of New Areas for Manager Aquifer Recharge) lo realiza un equipo pluridisciplinar (14 investigadores de ocho especialidades diferentes). En sus cuatro años de andadura, se ha arrojado bastante luz al estado del arte, especialmente en los aspectos relacionados con la gestión de la recarga de acuíferos o Managed Aquifer Recharge (MAR) de aquellas disciplinas más indirectamente relacionadas con la hidrogeología. GIAE (gestión integral del agua en la edificación) está más centrado en la hidrogeología urbana.

Ambos son secuenciales y consideran en total cinco líneas de acción o bloques de objetivos. El principal es determinar qué zonas de España son aptas para llevar a cabo nuevas operaciones de gestión de la recarga de acuíferos (que se han designado “zonas MAR”. Para ello se consideran distintas Fuentes de toma (especialmente ríos y depuradoras) y para diferentes usos (en especial el regadío, el almacenamiento profundo y usos medioambientales. Para determinar estas zonas se han tenido en cuenta más de 80 criterios diferentes. El más destacable puede ser la capacidad de almacenamiento. También es digno de mención, desde el punto de vista medioambiental, el diseño de nuevos indicadores, la aplicación de la técnica MAR como una medida paliativa que permite mitigar el vaciado de los acuíferos mediante la recarga en zonas de cabecera (áreas forestales en general); el desarrollo de una metodología para determinar el caudal ecológico de los cauces de toma, la aplicación de técnicas tipo SAT (Soil and Aquifer Treatment) en diferentes acuíferos y escenarios, la recarga artificial en áreas urbanas y el diseño de nuevos sistemas arquitectónicos.

El artículo describe las siguientes líneas de acción y algunos de los resultados:

- En hidrogeología se ha estudiado los dispositivos "clásicos" de recarga artificial, Se han inventariado 15 esquemas tradicionales y definido ocho nuevos. Se ha tipificado una metodología basada en operaciones de álgebra de mapas y adopción de indicadores medioambientales para determinar qué zonas de España son susceptibles para operaciones de Managed Aquifer Recharge (MAR). Aproximadamente el 16% del territorio peninsular es proclive a operaciones de recarga artificial con éxito. Las técnicas de Tratamiento de Suelo y Acuífero incrementan la efectividad del proceso, con incidencia en minimizar procesos colmatantes y la entrada de aire en el sistema mediante pretratamiento y otras técnicas experimentadas en dos dispositivos reales.

- En planificación ambiental se ha adoptado una metodología basada en seis grupos de criterios ambientales básicos para la aplicación de técnicas MAR: Fuentes de contaminación, riesgos, condicionantes, demandas, tendencias y ventajas.

- La determinación del caudal ecológico en los ríos de toma se ha estudiado mediante métodos hidrológicos, hidráulicos, métodos holísticos y métodos de simulación de hábitat. Este último ha dado los mejores resultados.

- En ingeniería forestal se ha cuantificado cómo las técnicas paliativas incrementan la recarga en los acuíferos, destacando la influencia positiva de las masas forestales en la cabecera de cuencas. Se proponen obras civiles en cabecera ensayadas en casos reales.

- En cuanto a la reutilización s.s., se están incorporando dispositivos de MAR en zonas urbanas en el marco de la gestión integral del agua en la edificación.

En definitiva, en todas las líneas de acción y disciplinas emprendidas, se ha constatado que las ventajas de la técnica MAR sobrepasan los inconvenientes, que la componente de innovación debe ser ensalzada y que quedan muchas lagunas en el estado del arte.

OBJETIVOS

Las pretensiones del artículo están orientadas a aportar una visión general y presentar ciertas conclusiones de las distintas líneas de acción, aglutinando distintos puntos de vista y enfoques de la gestión hídrica de los investigadores. Por tanto, el esquema tradicional de las publicaciones científicas resulta algo modificado y se remite al lector interesado en alguna línea de acción a la documentación que está generando el equipo investigador, dada la dificultad de sintetizar varios años de actividad en un artículo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Dado el carácter del artículo, divulgativo y unificador de distintas disciplinas, resulta complicado definir los métodos y materiales empleados en cada línea de acción, si bien todos ellos son de aceptación general.

La determinación de las "Zonas MAR" se ha realizado mediante operaciones de álgebra de mapas y coberturas temáticas, mediante una aplicación GIS (Dinamap)

suficientemente robusta para tratar hasta 83 capas y coberturas temáticas en la extensión de España.

RESULTADOS Y DISCUSION

Inventario de dispositivos genéricos existentes y propuesta de otros"nuevos"

El punto de partida ha sido el inventario de dispositivos genéricos existentes a nivel mundial, elaborando un catálogo de experiencias prácticas. Estos han sido agrupados de acuerdo con la clasificación de Gale, 2005. A los 15 de esta clasificación se han añadido y definido ocho más (tabla 1), basados, en general, en variaciones de sistemas de riego que incrementan el retorno a los acuíferos y la implantación de técnicas MAR en zonas urbanas.

SISTEMA	TIPO DE DISPOSITIVO
DISPERSIÓN	BALSAS DE INFILTRACIÓN
	CANALES DE INFILTRACIÓN
	TÉCNICAS DE TRATAMIENTO SUELO/ACUÍFERO
	CAMPOS DE INFILTRACIÓN
	RECARGA POR RETORNOS DE RIEGO
CANALES	DIQUES DE RETENCIÓN Y REPRESAS
	DIQUES PERMEABLES
	SERPENTEOS
	ESCARIFICACIÓN LECHO
	DIQUES SUBSUPERFICIALES/SUBTERRÁNEOS
	DIQUES PERFORADOS
POZO	QANATS (GALERÍAS SUBTERRÁNEAS)
	POZOS ABIERTOS DE INFILTRACIÓN
	POZOS PROFUNDOS Y MINISONDEOS
	SONDEOS
	DOLINAS, COLAPSOS…
	ASR/ASTR
FILTRACIÓN	BANCOS FILTRANTES EN LECHOS DE RÍOS (RBF)
	FILTRACIÓN INTERDUNAR
	RIEGO SUBTERRÁNEO
LLUVIA	CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA EN IMPRODUCTIVO
SUDS	RECARGA ACCIDENTAL CONDUCCIONES Y ALCANTARILLADO
	SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE

Tabla y figura 10-01. Inventario de dispositivos de gestión de la recarga de acuíferos (MAR) agrupados por tipologías (modificado de Gale, 2005).
Nota. Una ampliación se presenta en la figura 2-112.

N	SISTEMA	TIPO DE DISPOSITIVO	ICONO	FIGURA	FOTO	LEYENDA
1	DISPERSIÓN	BALSAS DE INFILTRACIÓN / HUMEDALES				Humedal artificial para la recarga del Sanchón, Coca, Segovia. Foto: DINA-MAR
2		CANALES Y ZANJAS DE INFILTRACIÓN				Canal de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste, Segovia, Spain, operativo desde 2002. Foto: DINA-MAR.
3		CABALLONES/TÉCNICAS DE TRATAMIENTO SUELO/ACUÍFERO	SAT			Caballones en el fondo de una balsa de infiltración. California. Foto: D. Peyton
4		CAMPOS DE INFILTRACIÓN (INUNDACIÓN Y DIFUSIÓN CONTROLADA)				Campo de infiltración de Omdel (Namibia). Foto: G. Tredoux.
5		RECARGA ACCIDENTAL POR RETORNOS DE RIEGO				Recarga artificial por retornos de riego. Extremadura, España.
6	CANALES	DIQUES DE RETENCIÓN Y REPRESAS				Dique de recarga artificial en cabecera de cuencas, Alicante
7		DIQUES PERMEABLES				Dique permeable en Huesca. Foto: Tragsatec.
8		SERPENTEOS / LEVEES				Serpenteos en Sacramento, California. Foto: A. Hutchinson.
9		ESCARIFICACIÓN LECHO				Escarificación del lecho del río Besós, Barcelona. Foto: J. Armentar.
10		DIQUES SUBSUPERFICIALES/SUBTERRÁNEOS				Dique subsuperficial (embalse de arena) en Kytui, Kenia. Foto: Sander de Haas.
11		DIQUES PERFORADOS				Dique perforado. Lanjarón. Granada. España. Foto: Tragsatec.
12	POZOS	QANATS (GALERÍAS SUBTERRÁNEAS)				Qanat de Carbonero el Mayor. Segovia. Foto: E.F. Escalante
13		POZOS ABIERTOS DE INFILTRACION				Pozo abierto de infiltración. Arizona, USA. Foto: DINA-MAR
14		POZOS PROFUNDOS Y MINISONDEOS				Pozo de recarga artificial. Cornellá, Barcelona. Foto: DINA-MAR
15		SONDEOS				Sondeo para MAR (ASR) en Adelaida. Foto: P. Dillon.
16		DOLINAS, COLAPSOS...				Colapso cárstico "El Hundimiento". Alicante, España. Foto: DINA-MAR
17		ASR	ASR			Dispositivo ASR en Scottsdale. Arizona. Foto: DINA-MAR
18		ASTR	ASTR			Dispositivo ASTR en California.
19	FILTRACIÓN	BANCOS FILTRANTES EN LECHOS DE RÍOS (RBF)	RBF			Sistema RBF para MAR en Eritrea. Foto: A. Twinhof.
20		FILTRACIÓN INTERDUNAR				Filtración interdunar cerca de Amsterdam, Holanda. Foto: Aitus.
21		RIEGO SUBTERRÁNEO				Riego subterráneo en Andalucía. Foto: Tragsa.
23	LLUVIA	CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA EN IMPRODUCTIVO				Captación de lluvia en improductivo para MAR.
24	SUDS	RECARGA ACCIDENTAL CONDUCCIONES Y ALCANTARILLADO				Recarga artificial desde el alcantarillado en España. Foto: Tragsa
25		SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE				SUDS. Gomezserra. Madrid.

Estudio para la determinación de las "Zonas MAR" en España y atribución del dispositivo más idóneo

Se ha llevado a cabo un complejo proceso basado en GIS para determinar las zonas de España susceptibles de aplicar técnicas de Managed Aquifer Recharge, que han sido designadas "Zonas MAR", con aguas de origen fluvial y de depuradoras.

El proceso ha sido iterativo, probando diferentes opciones de álgebra de mapas reductivas con hasta 83 capas y coberturas GIS. Cabe destacar la capa de afloramientos permeables, litología, acuíferos, nivel del agua, cauces fluviales, depuradoras, estaciones de aforo con medidas excedentarias, pendientes, altitud, distancia a la costa, etc. La componente de R+D principal se ha basado en estudiar qué secuencia deductiva conducía a resultados similares a los inventarios ya existentes. Tras varios ensayos se han definido las "Zonas MAR" en España, cuya agrupación por cuencas hidrográficas figura en la tabla 10-02.

ID	CUENCA	total cuenca (km^2)	Sup. cuenca (km^2)	% cuenca	% total
1	NORTE	1952.98	53780.90	3.63	2.92
2	DUERO	21565.45	78955.69	27.31	32.26
3	TAJO	10186.19	55814.90	18.25	15.24
4	GUADIANA	5183.57	60125.19	8.62	7.75
5	GUADALQUIVIR	4878.02	63298.10	7.71	7.3
6	SUR	1457.55	18408.22	7.92	2.18
7	SEGURA	2282.97	18833.04	12.12	3.41
8	JUCAR	7891.79	42682.26	18.49	11.8
9	EBRO	8686.32	85936.39	10.11	12.99
10	PIRINEO	1746	16555.28	10.55	2.61
11	BALEARES	1023.07	5038.33	20.31	1.53
	TOTAL	**66853.9**	**499428.31**	**13.39**	**100**

Tabla 10-02. Datos relativos a la distribución de zonas MAR por cuencas hidrográficas. Columnas: superficie de la cuenca y de la "zona MAR" circunscrita en ella y porcentaje que representa respecto a cada cuenca y al total.

Aproximadamente **un 16 % (67.000 km^2)** del territorio de España peninsular e Islas Baleares es susceptible a la gestión de la recarga. Las cuencas más idóneas son Duero y Baleares; y las menos las del norte y Guadalquivir.

Para facilitar la identificación de las "Zonas MAR" se han elaborado 11 mapas coropléticos por cuencas hidrográficas. Un ejemplo de los resultados para la cuenca más idónea se presenta como figura 10-1. La totalidad de las cartografías se encuentran en www.dina-mar.es.

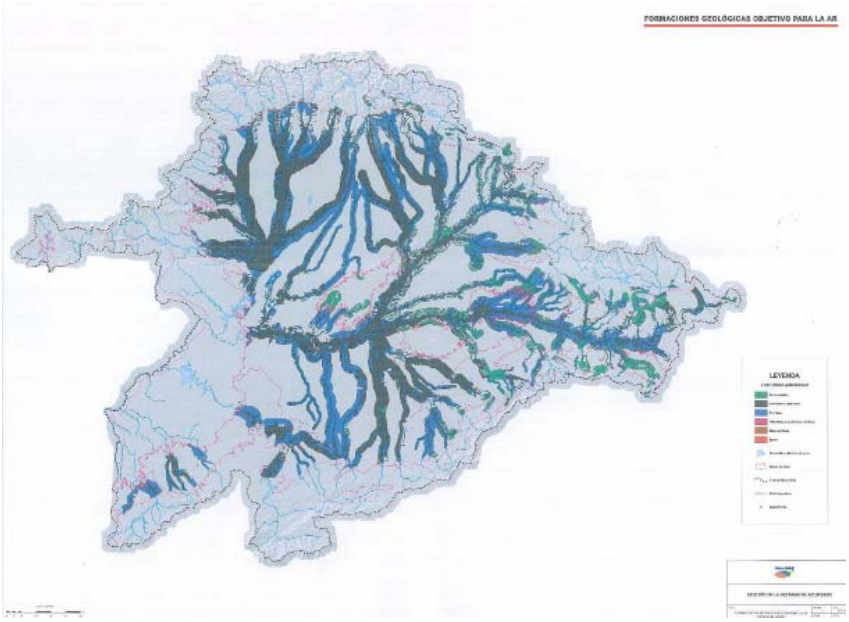


Figura 10-02. Distribución de las "zonas MAR" en la cuenca del río Duero, las más proclive a la recarga artificial del territorio español.

BÚSQUEDA DE CRITERIOS PARA ASOCIAR DISPOSITIVOS CON CADA "ZONA MAR"

Con los elementos físicos bien definidos y conociendo las especificaciones de los **23 dispositivos de AR** inventariados, se ha diseñado y automatizado un sistema de rangos-pesos, de modo que cada dispositivo recibe un peso según su idoneidad y ajuste a las características físicas y a los restantes indicadores con respaldo GIS.

Los principales criterios de asociación considerados, apoyados en capas y coberturas temáticas, se ha basado en un sistema de rangos-pesos.

Los rangos establecidos han sido la distribución de permeabilidades, litologías, contaminación por nitratos, zonas regables y origen del regadío, cercanía a bosques, depuradoras (con su tipo de tratamiento), embalses (con su capacidad asociada), humedales, ríos (con su caudal medio asociado), a la costa y a acueductos importantes; pendiente, altura, riesgo de inundación, nivel del agua, calidad de las aguas, estaciones meteorológicas con excedentes hídricos y áreas urbanas principalmente. Los pesos van entre cero (inadecuado) y tres (muy favorable).

Creando una estructura relacional entre factores físicos e indicadores con respaldo GIS y los dispositivos MAR, se ha diseñado y automatizado una matriz de asociación que alimenta al Geoportal DINA-MAR (Tabla 10-03). El resultado es una cartografía a gran escala con una jerarquización de cuáles son los dispositivos más recomendables hasta los inviables (Figura 10-03). La tabla detallada se ha descrito en el capítulo 5 (geografía y SIG).

ZONAS MAR	CÓDIGO	TÉCNICAS Y DISPOSITIVOS DE MAR: 1 BALSAS DE INFILTRACIÓN / HUMEDALES	2 CANALES DE INFILTRACIÓN	3 CABALLONES/TÉCNICAS DE TRATAMIENTO SUELO/ACUÍFERO	4 CAMPOS DE INFILTRACIÓN (INUNDACIÓN Y DIFUSIÓN CONTROLADA)	5 RECARGA ACCIDENTAL POR RETORNOS DE RIEGO	6 DIQUES DE RETENCIÓN Y REPRESAS	7 DIQUES PERMEABLES	8 SERPENTEOS LEVEES	9 ESCARIFICACIÓN LECHO	10 DIQUES SUBSUPERFICIALES/SUBTERRÁNEOS	11 DIQUES PERFORADOS	12 QANATS (GALERÍAS SUBTERRÁNEAS)	13 POZOS ABIERTOS DE INFILTRACIÓN	14 POZOS PROFUNDOS Y MINISONDEOS	15 SONDEOS	16 DOLINAS, COLAPSOS...	17 ASR	18 ASTR	19 BANCOS FILTRANTES EN LECHOS DE RÍOS (RBF)	20 FILTRACIÓN INTERDUNAR	21 RIEGO SUBTERRÁNEO	22 CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA EN IMPRODUCTIVO	23 RECARGA ACCIDENTAL CONDUCCIONES Y ALCANTARILLADO	24 SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE
		DISPERSIÓN					CANALES				POZOS									FILTRACIÓN		LLUVIA	SUDS		
Afloramientos permeables MMA 2006	MUY ALTA	3	3	1	3	2	2	2	3	3	1	2	1	3	3	1	3	1	1	3	1	1	1	1
	ALTA	3	3	1	3	2	2	2	2	2	1	2	1	3	3	1	1	1	1	2	1	1	1	1
	MEDIA	2	2	1	2	2	2	2	1	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1
Geología de España a escala 1:200.000, MMA 2006	ALUVIAL	3	3	2	3	1	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3		3	3	3		1	1	1
	DETRÍTICO	3	3	2		1	3	3			3	3	3	2	2	3		3	3		3	1	1	1	1
	KÁRSTICO	2	2	2	0,5	1	2	2			1	2	3	3	3	2	3	3	3			1	1	1	1
	METAMÓRFICO	0,2	2	2	0,5	1	1	3			1	3	1	1	1	1		1	1			1	1	1	1
	VOLCÁNICO	0,2	2	2	0,5	1	1	2			2	2	2	1	1	1		1	1			1	1	1	1
	INTRUSIVO	0,2	2	2	0,5	1	1	2			2	2	1	2	1	1		1	1			1	1	1	1
Red de control de nitratos en las aguas subterráneas	<50	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	>=50	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Zonas declaradas vulnerables 2005		1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Regadío: Origen del agua	SUPERFICIALES	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	1	3	3	1	3	1	3	1	1	2	1	1	1
	SUBTERRÁNEAS	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
	RETORNOS		2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	DEPURADORAS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
	DESALINIZADORAS	3	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
Polígonos concéntricos distantes de 1 a 5 km de los cauces con caudal medio/ 1 km de los embalses	EMBALSE <=1 km	2	1	2	3	1	2	1	2	2	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1
	RÍO <=1 km	3	1	1	3	1	3	3	3	3	1	3	2	1	1	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1
	RÍO >1 y <=2	1	2	1	2	1	1	0,5			1		2	1	1	2	1	2	3			1	1	1	1
	RÍO >2 y <=3	1	2	1	1	1	1				1		1	1	1	1	1	2	3			1	1	1	1
	RÍO >3 y <=4	1	2	1	1	1	1				1		1	1	1	1	1	1	2			1	1	1	1
	RÍO >4 y <=5	1	1	1	0,5	1	0,5				1		1	1	1	1	1	1	1			1	1	1	1
Riesgo de inundación	SIN RIESGO	1	1	1							1		1	3	3	3	1	3	3	1	1	1	1	1	1
	MÁXIMO			2	3		3	3	3	3	1	3	1				1	0	0	1	1	1	1	1	1
	MEDIO	0,5	0,5	2	3	0,5	2	3			1	3	1	2			1	0	0	1	1	1	1	1	1
	MINIMO	2	0,5	2	2	0,5	0,5	2			1	2	1	3	3	1	1	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1
Representación de áreas que se encuentran dentro de un intervalo de pendiente preestablecido	0- 10	3	3	1	3	1	3	0,5	3	3	3	1	1	3	3	3	1	3	3	3	1	1	1	1	1
	10-20		3	1		1	3	3	0,5	0,5	2	1	1	3	2	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1
	20-30		2	2		1	2	3			1	3	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	30-40		1	2		1	0,5				1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	40-50		1	2		1						2	1	1	1	1	1	1	1			1	1	1	1
Representación de las áreas que distan hasta 1 Km de los límites de los humedales	<=1 km	1	1	1	3	1	2	1	1	1	2	1	1	2	3	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1
Acueducto Tajo-Segura	<=1 km	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	2	1	2	2	1		1	1	1	1
Calidad de las aguas. Conductividad >2500	< 2500	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
	> 2500										2											2	1	1	1
Datos de minas del MMA (1996). Minas en acuíferos		2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1	1	3	3	3	1	1	1	1	1	1
Redes de control de las aguas subterráneas 2007 + datos calidad + piezometría	<25	3	3	1	3	3	3	1	3	3	3	1	3	3	1		1			3	1	3	1	1	1
	>25 y <=50	2	2	1	1	2	0,5	1	0,5	2		0,5	2	2	2	1	1	0,5	0,5	0,5	1	2	1	1	1
	>50 y <=75	0,5	0,5	1	0,5	0,5		1							2	2	1	3	1		1		1	1	1
	>75			1				1								3	1	3	3		1		1	1	1
Masas Forestales a escala 1:1.000.000		1	1	2	1	1	3	3	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unidades hidrogeológicas susceptibles de recarga artificial según el IGME		2	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1
Estaciones meteorológicas de zonas o subcuencas con excedentes hídricos		2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1
Depuradoras	<20.000	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	>=20000 y <200.000	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1	2	2	2	1	1	1	1	1
	>=200.000		1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1	2	2	2	1	1	1	1	1
Depuradoras por lagunaje		3	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Áreas urbanas detalladas		0,5	0,5	1		2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	3	3	3
Buffer 5 km Áreas urbanas detalladas	<20.000	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	2	2
	>=20000	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3

Tabla 10-03. Aspecto de la tabla que relaciona los factores físicos e indicadores con respaldo SIG con los distintos dispositivos MAR.

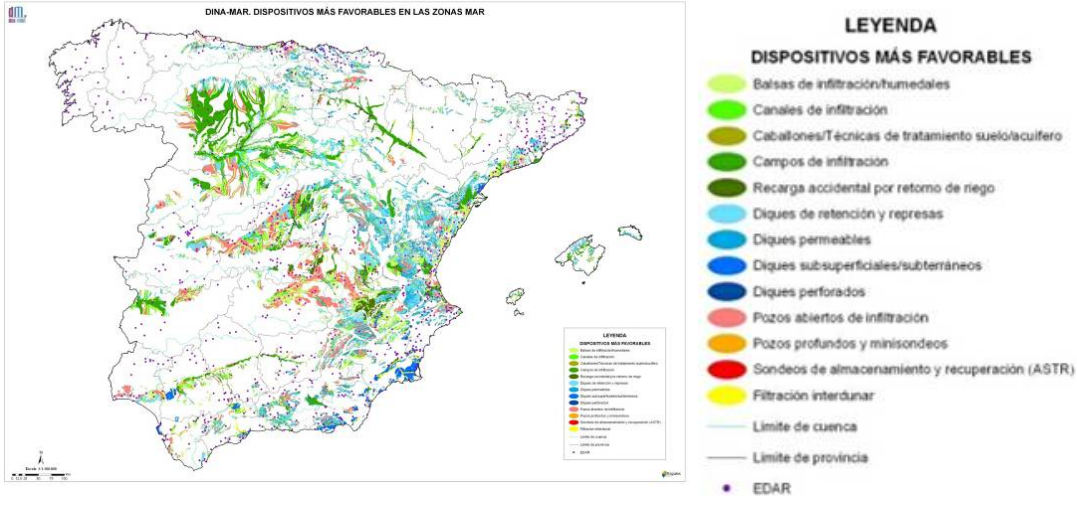


Figura 10-03. Cartografía provisional con la atribución de los dispositivos MAR más idóneos para cada "zona MAR".

Este sistema ha permitido identificar algunas zonas MAR de muy alta idoneidad. Por ejemplo, el acuífero del Bajo Guadalhorce (Málaga), considerando aguas procedentes del río y de una depuradora. En esta zona se concentran hasta 11 dispositivos MAR (Figura 10-04).

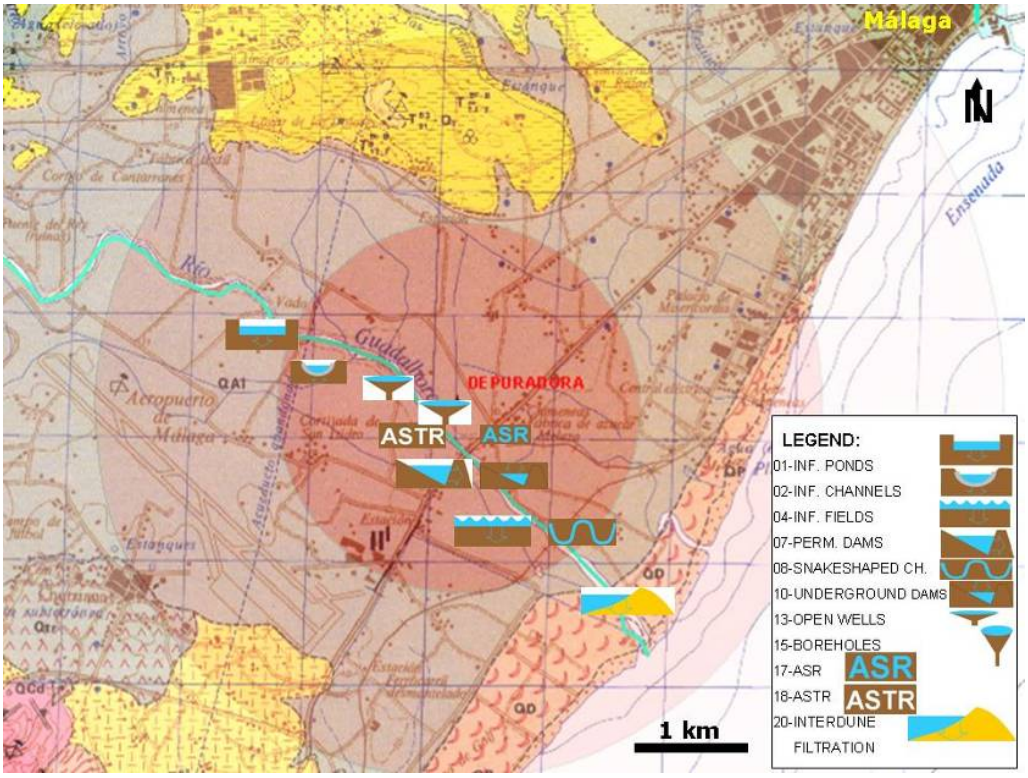


Figura 10-04. Ejemplo para el acuífero del Bajo Guadalhorce (Málaga). Propuesta de la ubicación de dispositivos MAR, obtenido con el sistema matricial rangos-pesos designado hidrogeoportal DINA-MAR.

POTENCIAL DE LA TÉCNICA MAR EN ESPAÑA

Partiendo de la premisa defendida en DINA-MAR de que nuestro futuro en materia de aguas pasa por nuestra capacidad para almacenarla, se ha realizado un cálculo del potencial de almacenamiento en los acuíferos de España actualmente desaturados frente a la capacidad de almacenamiento en las presas.

Partiendo del almacenamiento en embalses en España en enero de 2005, que ascendía a 53.198 hm3, y la determinación de las “Zonas MAR”, se ha hecho un cálculo con apoyo GIS basado en la profundidad del nivel del agua, la permeabilidad de los acuíferos y sus coeficientes de almacenamiento.

El resultado es que el subsuelo español (excluyendo las islas Canarias) tiene una cabida media aproximada de 2 hm^3/km^2 en las Zonas MAR, es decir, **el volumen**

almacenado en las presas podría almacenarse en los acuíferos en un 260 %, salvaguardando su calidad y con plena viabilidad, permitiendo además la ocupación superficial del terreno.

Aspectos medioambientales

METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LOS CAUDALES AMBIENTALES EN LOS CAUCES DE TOMA

La toma de caudales desde cauces fluviales y depuradoras debe tener en cuenta los caudales ambientales, si bien, gran parte del agua derivada para recarga artificial (en adelante, AR) forma parte del caudal ambiental, al quedar retenida en el espacio y tiempo. Se ha diseñado una metodología basada en **consideraciones climáticas, temporales, espaciales y del subsuelo de cada cauce.** Los principales aspectos a tener en consideración en cada estudio individualizado son:

- Deben clasificarse los tramos de río, así como decidir qué clasificaciones van a considerarse como prioritarias
- Debe definirse con precisión el nivel de detalle del estudio, y cuales son las principales especies objetivo de los diferentes tipos de cauces.
- Debe decidirse si se van a evaluar tramos concretos o cuencas en su conjunto.
- En todas las zonas que se quieran evaluar, es necesario conocer todas las concesiones de extracción de agua de los cauces, las presas y minicentrales.
- La determinación de los caudales debe aunar, además de los criterios mencionados, objetivos geomorfológicos, riparios, de calidad de las aguas, de fauna silvestre del ecosistema fluvial y/o litoral (en su caso), cantidad y calidad de las aguas subterráneas, valores paisajísticos, uso público, etc.

PLANIFICACIÓN AMBIENTAL

En planificación ambiental se ha adoptado una metodología basada en seis grupos de criterios ambientales básicos para cuestionar la aplicación de técnicas MAR: Fuentes de contaminación, riesgos, condicionantes, demandas, tendencias y ventajas. Con ellos se han elaborado indicadores medioambientales tipo PER (Friends & Raport, 1979), aplicando además un sistema de rangos-pesos. Veamos cómo se han diseñado estos criterios:

- Fuentes de contaminación: Determinados usos ya establecidos provocan determinados riesgos de contaminación, atendiendo a la forma de dispersión (la difusa es más difícil de controlar pero la puntual suele ser más grave en sus efectos inmediatos) y a su origen: Cada una implica la existencia de riesgos para la calidad del agua a recargar. Los nitratos, restos de componentes químicos de síntesis o sólidos arrastrados requieren diferentes tratamientos antes de usar un aporte de origen agroganadero, industrial o de escorrentía natural para la recarga. Se han diferenciado contaminación urbana, agraria, ganadera, industrial y por sólidos en suspensión.

- Riesgos: La localización o uso del terreno determina riesgo que pueden poner en peligro la viabilidad de la recarga o la necesidad de dicha actuación. Se han propuesto

la intercepción de flujos (acuíferos y escorrentías), vertidos accidentales, presencia de endemismos biológicos, intrusión salina o marina y efectos sobre la salud.

- Condicionantes: Existen características intrínsecas al uso o a la asociación que exigen un tipo u otro de dispositivo MAR o simplemente determinan que dicha recarga no supere ciertas limitaciones, tales como alta pendiente, alta escorrentía, cota alta, lámina libre de agua continua o temporal, freático alto y existencia de periodos secos.

- Demandas: Las necesidades varían no solo en cuanto a calidad exigible sino también a su distribución espacial y temporal. Se han propuesto: agua potable, recreativa (baño), ecológica, refrigeración, riego y energía hidroeléctrica.

- Tendencias: De cara a una viabilidad y rentabilidad de los dispositivos, es preciso evaluar tanto los usos actuales como las tendencias que se esperan en dichos usos. Se proponen: intensificación, sensibilidad al cambio climático, demanda potencial de riego y zona preferente de restauración.

- Ventajas: Se han propuesto: generación de retornos, filtro verde, localización zonas de recarga, descarga lenta, fuente para desaladoras y para depuradoras.

El cruce de los criterios de planificación ambiental y las zonas MAR y su uso del suelo actual (CORINE) han permitido definir una matriz (tabla 3), que permite evaluar la **capacidad y la condicionalidad de cada tipo de uso/cobertura con respecto a cada posible actuación MAR y evaluar sus riesgos**. En dicha tabla se han marcado con una X las relaciones entre filas y columnas para cada descriptor. Para cada grupo de consideraciones ambientales se ha contabilizado el número de cruces, generando un indicador, cuya evolución en el tiempo permitirá caracterizar la potencialidad ambiental de cada zona MAR y de cada nueva actuación.

De esta forma se pretende obtener “mapas de capacidad de usos” para los distintos factores que determinan el medio donde se puede implantar un nuevo dispositivo MAR.

	CONTAMINACIÓN						RIESGOS					CONDICIONANTES						DEMANDA						TENDENCIAS			VENTAJAS						
	dispers	por uso																															
DESCRIPCION	Fuente difusa	Fuente puntual	Contaminación urbana	Contaminación agraria	Contaminación ganadera	Contaminación industrial	Contaminación por SS	Intercepción de flujos	Vertidos accidentales	Endemismos biológicos	Intrusión salina	Efectos sobre la salud	Alta pendiente	Alta escorrentía	Cota alta	Lámina libre de agua continua	Lámina libre de agua temporal	Freático alto	Existencia de periodos secos	Potable	Recreativa (baño)	Ecológica	Refrigeración	Riego	Energía	Intensificación	Sensible a cambio climático	Demanda potencial para riego	Zonas preferentes de restaurac	Generación de retornos	Filtro verde	Localización de recarga	Descarga lenta	Fuente para desaladora	Fuente EDAR	Infiltración mínima	TOTAL
Zonas industriales		X				X			X		X	X								X		X							X						8
Zonas de extracción minera		X				X	X	X	X		X	X										X						X		X					10
Escombreras y vertederos		X				X		X				X													X			X							6

Tabla 10-04. Ejemplo de la matriz de cruce con tres clases de usos del suelo y los condicionantes ambientales de cada actuación MAR. El total de cruces constituye un indicador de potencialidad ambiental. La tabla original contempla 85 casuísticas.

Finalmente se ha desarrollado un **estudio económico** basado en el ratio de inversión, o coste del dispositivo frente al agua que permite gestionar. Los ratios para dispositivos MAR superficiales **rondan 1/5 del ratio de las presas**, mientras que para sondeos profundos/ASR el valor del ratio es parecido.

Técnicas de Tratamiento de suelo y Acuífero (SATs) y diseños mejorados aplicados a la agro-hidrología

A partir de la descripción y análisis de las distintas tipologías de impactos negativos y problemas encontrados en los dispositivos MAR, se proponen binomios "problema-solución" de carácter aplicado y basados en SATs, como:

- Es preciso minimizar la tendencia descendente de la tasa de infiltración regulando el caudal y disminuyendo los finos y el aire en el agua de AR. Para ello conviene no "batir" las aguas y recargar lentamente.

- Los caballones en el fondo de las balsas y canales aumentan la infiltración hasta en un **25%.**

- Los sistemas de vasos comunicantes en canales, y las válvulas en los equipamientos para pozos, reducen la disolución de aire en el agua en torno a 2 ppm.

- La medida SAT más efectiva es el pretratamiento del agua de recarga, acompañada de un buen mantenimiento, lo que minimiza la colmatación (Bouwer, 2002).

- Dada la alta complejidad de estas operaciones, resulta preciso contar con plantas piloto donde ensayar nuevas tecnologías, dispositivos, etc.

La aplicación de las actuaciones más recomendables suele conllevar la interacción de impactos medioambientales de signo contrario. De este modo, la alternativa más recomendable es la creación de un sistema integrado en el que el balance sea de signo positivo, tenga carácter integral y alta resiliencia.

Las zonas de estudio también están siendo objeto de investigaciones de diseño y establecimiento de parámetros de control y mantenimiento, que faciliten su operatividad y eleven su efectividad. Los prototipos propuestos en DINA-MAR cuentan con desarrollos de ingeniería para conseguir minimizar pérdidas (evapotranspiración, fugas, etc.), facilitar las labores de descolmatación, reducir los costes de transporte, almacenamiento y bombeo, permitir funcionar en el punto óptimo de recarga (incluso en situaciones de suelo congelado o avenidas) y tener una vida útil suficientemente alta para ser en Tablas. Además los costes de construcción y mantenimiento deben ser bajos.

MAR aplicada a la gestión hídrica paliativa y a la ingeniería forestal

Las técnicas paliativas de gestión hídrica basadas en la recarga en áreas forestales y de cabecera de cuenca estudiadas hasta la fecha están arrojando muy buenos resultados, en cuanto permiten disponer de un volumen de aguas subterráneas importante en las "cabeceras" de los acuíferos, a la vez que ayudan a reducir el efecto devastador de avenidas, etc.

El dispositivo más adecuado son los diques, que incrementan las reservas en los acuíferos de manera considerable, según se ha constatado con estudios y datos reales desarrollados en el Este de España, donde, a partir de estudios con datos climáticos y de infiltración de cinco años de duración en dos zonas puntuales, los bosques han permitido la infiltración de un volumen de agua por encima del **20% más en el subsuelo que las áreas deforestadas** (Copano *et al*, 2010).

La realización de infraestructuras seriadas en las cuencas de cabecera y a lo largo de los cauces, así como la reforestación de áreas de recarga y su gestión adecuada, suponen un incremento en la recarga de los acuíferos y en su disponibilidad hídrica. Igualmente, esa gestión forestal favorece una mayor calidad de las aguas y el mantenimiento o aparición de ecosistemas con mayor calidad ambiental.

Hidrogeología urbana

Como criterio de reutilización en el sentido estricto, los dispositivos MAR están incorporándose cada día más a la hidrogeología urbana, dentro del contexto de la gestión hídrica en la edificación. Estos avances se llevan a cabo especialmente mediante el empleo de sistemas urbanos de Drenaje sostenible o Sostenible Urban Drainage Systems (SUDS) y la Gestión Integral del Agua en la edificación (GIAE).

Como consecuencia de la urbanización extensiva, en las ciudades se pierde hasta un 90% del agua de lluvia. Es necesario por tanto rediseñar el recorrido completo del agua por el entorno edificado (GIAE). Para el desarrollo de un nuevo modelo se establecen los siguientes ámbitos:

1 NORMATIVA	Estudio de la normativa española y europea aplicable, así como sus déficits y posibles mejoras.
2 ESTADÍSTICA	Toma / recopilación de datos y análisis de las conclusiones derivadas (p. ej. Caudales, temperaturas, consumos, gastos derivados…)
3 TRATAMIENTO	Sistemas de tratamiento en recorrido y final, variantes existentes y proposición de mejoras y nuevos modelos.
4 CAPTACION	Análisis de sistemas existentes para el aprovechamiento de agua de lluvia, variantes y nuevas soluciones.
5 ENERGÍA	Inclusión de la energía (incluir ganancias o minimizar pérdidas optimizando recursos) en el ciclo urbano del agua.
6 ACTUALIZACION	Actualización del estado del arte en cuanto a los sistemas emergentes.
7 INFORMACIÓN	Difusión del conocimiento y síntesis de los resultados.

Las técnicas deben ir encaminado a **alcanzar "buenas prácticas urbanas",** destacando:

- Minimizar la escorrentía superficial en la ciudad.
- Drenar hacia zonas verdes en vez de derivar el agua al alcantarillado.
- Recoger pluviales para uso posterior: riego, cisternas, lavadoras…
- Mantener la ciudad limpia de modo periódico.
- Concienciación de fuentes contaminantes: talleres, hospitales, fábricas…

- Minimizar el uso de herbicidas y fungicidas en parques.
- Educación de todos los agentes implicados en el diseño y mantenimiento de la ciudad.

El fin último es la rotura de la escorrentía urbana superficial, **recuperar la capacidad de infiltración originaria del terreno y romper el efecto "isla de calor" en las ciudades**.

CONCLUSIONES

- El futuro de las técnicas especiales debe pasar por mejorar los mapas de "Zonas MAR" y de potencialidad ambiental, teniendo en mayor consideración la recarga artificial profunda en acuíferos multicapa.

- Es preciso profundizar en los aspectos económicos de la técnica MAR, así como hacer una valoración contingente de los aspectos ambientales y sociales, teniendo en consideración los costes de oportunidad del recurso.

- Los nuevos diseños deben encaminarse a dispositivos de bajo coste.

- GIAE abre una adecuada línea de investigación en el marco de la hidrogeología urbana, si bien el concepto de los SUDS queda limitado en algunos aspectos que deben englobarse en proyectos de mayor gestión del agua en la edificación, y ésta en la gestión integral.

- En su globalidad, de todas las líneas de acción y disciplinas consideradas, se observa que las ventajas de la técnica MAR sobrepasan los inconvenientes, que la innovación debe tener un énfasis mayor y que todavía quedan muchos huecos en el estado del arte, y especialmente, en las ciencias más apartadas de la hidrogeología.

- Cabe destacar la necesidad de prolongar este tipo de proyectos de investigación, para dar respuesta a las nuevas amenazas del siglo XXI, tales como la contaminación de las aguas con sustancias emergentes, cambio climático, etc. Tan alta complejidad conlleva la necesidad de equipos pluridisciplinares.

- Es preciso estar alerta sobre los descubrimientos tecnológicos futuros en cuanto a la contribución que pueden aportar a la gestión hídrica integral, tanto de aguas superficiales como subterráneas. Por tanto, es preciso tanto tener un buen acceso a autopistas de la información como mejorar la formación hidrológica de los usuarios, facilitando así su participación pública y atrayendo así su responsabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Bouwer, H. (2002). "Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering". Hidrogeology Journal, Vol. 10, nº 2, April 2002.
- Copano González de Heredia, C, Fernández Escalante, E y Minaya Ovejero, M.J. (2010). "Técnicas paliativas de gestión hídrica. El incremento de la reserva mediante la gestión de la recarga de acuíferos en áreas forestales". Revista Tecnología y desarrollo nº 9.
- Fernández Escalante, A.E. (2009). "Técnicas de tratamiento de suelo y acuífero (S.A.T.) aplicadas a la gestión de la recarga artificial". Serie Hidrogeología Hoy. Grafinat. 2ª edición. http://www.hidrogeologia.es
- Friends, A. y Raport, D. (1979). "Towards a comprehensive framework for environment statistics: stress-response approach". Ottawa, Canada: Statistics Canada.
- Gale I. (2005). "Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas". IAH–MAR, UNESCO IHP. Paris, Francia.

CONCLUSIONES FINALES

Tras haber tratado los diferentes tipos de dispositivos de gestión de la recarga (antes recarga artificial de acuíferos) o simplemente "MAR" y los diferentes campos en los que interactúa con el medio, es hora de llamar la atención sobre las ventajas y problemáticas que presentan.

Como primer punto a resaltar, este tipo de técnicas están teniendo una gran aceptación en el resto del mundo. El hecho de considerar que sólo el 2,5 % del agua de la Tierra es agua dulce, y que la mayor parte de este porcentaje está congelado en los casquetes polares, nos hace reflexionar sobre el valor contingente y tangible del recurso agua; la conclusión es clara: incalculable.

En este contexto, la técnica MAR se configura como un conjunto de actuaciones o técnicas que permiten aumentar los recursos hídricos subterráneos disponibles y permiten su gestión sostenible. Es importante mencionar que en este libro se han tipificado y descrito 24 clases de dispositivos, lo que da un amplio baremo de condiciones de aplicación para todos los escenarios posibles.

Los principales motivos por los que en muchos lugares se ha llevado a cabo la técnica MAR son, por un lado, proporcionar el abastecimiento necesario para el consumo humano, y por el otro, suministrar el agua necesaria para el regadío, ecosistemas, etc. Dentro de este último uso, se puede distinguir dos grandes bloques o tipos de necesidades, las generadas por actividades que se centran en la agricultura y aquellas cuyo fin es meramente recreativo y estético, como los campos de golf, fútbol, parques, jardines, etc. Este tipo de técnicas se puede complementar con la reutilización de aguas de depuradoras y excedentes de desaladoras.

Sin embargo, esta visión no ha llegado a profundizar en la población española. Tal vez sea por tradición, o porque obras con "más hormigón" cuestan más y tienen mejor y mayor publicidad que este tipo de técnicas, que resultan desconocidas para muchos ciudadanos. Este es el principal motivo por el que la adecuada divulgación en este tipo de proyectos es muy necesaria, y por ello, hay que hacer hincapié en varios puntos.

La gestión de la recarga puede tener una influencia positiva en el medio ambiente. Una de las primeras observaciones que se hace tras realizar este tipo de actuaciones es el incremento de los niveles piezométricos, y por ende, del almacenamiento, que reduce la sobreexplotación que pueda tener el acuífero tras extracciones excesivas durante años.

Otro objetivo que se puede alcanzar es la obtención de una mejora de la calidad de las aguas, debido a la posibilidad de que el propio terreno actúe de filtro. Es cierto que también se obtiene una disminución de la concentración de contaminantes en el acuífero al aumentar los recursos hídricos subterráneos.

Este tipo de técnicas también otorgan la posibilidad de conseguir la regeneración de humedales. Esto es muy significativo, por que genera un aumento y protección de la

flora y fauna de estos tipos de ecosistemas, además de favorecer la belleza y percepción paisajista de la zona. Los ejemplos monitorizados están arrojando resultados excelentes.

Figuras 10-05 a) y b). Regeneración de la Laguna de la Iglesia. Segovia, a) Febrero 2006; b) Mayo 2006.

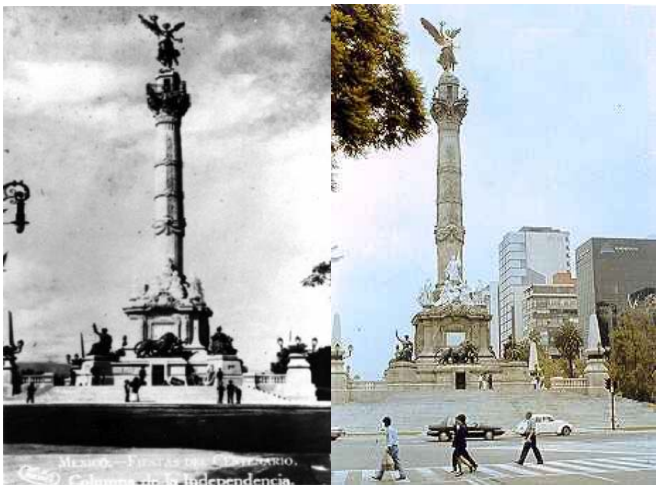
Continuando con las aplicaciones ambientales, uno de los principales fenómenos preocupantes de nuestras costas es la contaminación de los acuíferos por intrusión salina. Este fenómeno se ha ido produciendo por una excesiva extracción del agua subterránea de los acuíferos costeros. Para remediar esta situación, en bastantes zonas del mundo se está utilizando la recarga artificial. Un ejemplo muy cercano es la barrera hidráulica formada por pozos de recarga que se está realizando en el delta del Llobregat, en Barcelona, que también está arrojando buenos resultados refrendados con modelación a largo plazo.

Con respecto al medio ambiente, citar por último que este tipo de técnicas pueden aliviar los efectos de la desertización y erosión del suelo que tanto se sufre en el sur y levante de la Península Ibérica y que muchas veces son generados por la sobreexplotación de los acuíferos, además de la propia contribución del y sobre el clima. Para evitar estas consecuencias, la técnica MAR proporciona técnicas e instrumentos que regulan la escorrentía y reducen la erosión (véase presas o diques en los tipos de dispositivos), además de incrementar la infiltración del agua al acuífero en volumen total. Por estos motivos, queda abierta la puerta para ahondar en la idoneidad de aplicar técnicas MAR como actuaciones paliativas del cambio climático en el futuro.

En los últimos años se han desarrollado aplicaciones ingenieriles de estas actuaciones y parecen tener un futuro prometedor.

Como ejemplos, el proyecto piloto innovador en Totana, Murcia que consiste en la extracción de agua por un sondeo para obtener el aprovechamiento del calor latente del pozo (véase el capítulo de inventario) vincula definitivamente esta técnica con la problemática energética que sufre el planeta tras la crisis del petróleo. Hay varios ejemplos mundiales al respecto de distinto calado.

En cuanto a prevención o corrección de problemas geotécnicos, por citar alguno, está el caso de la Ciudad de México, dónde se ha puesto en marcha una planta piloto que tiene como objetivo tratar el agua, para posteriormente inyectarla en el subsuelo y así recargar el acuífero y disminuir los hundimientos y colapsos que desde varias décadas lleva sufriendo esta ciudad. Esta técnica podría ser aplicada en escenarios análogos con problemas similares, como Bangkok, la ciudad de Murcia, etc.



Figuras 10-06 a) y b). Ángel de la Independencia de México. A la hora de construir este monumento, se realizó una cimentación importante, pero el terreno de alrededor, con el paso de los años, sufrió asientos y por ello, hubo que construir una escalinata para llegar a él (véase la foto de la dcha). Tomado de http://www.exploramex.com/epocaIndep/Terrem1985.htm.

Otra de las últimas aplicaciones es la mejora de la ordenación urbana de las grandes ciudades, donde se desaprovechan las aguas pluviales, se contaminan y se perjudican los acuíferos. Este tipo de dispositivos se conocen como Sistemas de Drenajes Urbanos Sostenibles (SUDS), ya descritos, y de los cuales hay que resaltar que su finalidad es incorporar el agua de las ciudades al ciclo del agua (depurándola en todos los sitios donde sea posible), favorecer la recarga de acuíferos, disminuir la predominancia del “gris”, otorgar a las ciudades una percepción paisajística más agradable, reducir las inundaciones y obtener una reducción del “efecto isla de calor”.

Uno de los últimos avances del proyecto DINA-MAR ha sido la utilización de SIG para elaborar un visor Web que analice las zonas españolas más favorables a la instalación de dispositivos de gestión de la recarga.

Cabe incidir en la importancia de la difusión y transferencia de tecnología. El acercamiento de estas técnicas a la población es clave, además de que aumenta la posibilidad de que surjan nuevos proyectos, experiencias y aumente el estado del arte en general.

Para obtener todos estos objetivos es necesario disponer de equipos pluridisciplinares. Dentro del marco del proyecto DINA-MAR han trabajado una gran variedad de

profesionales de distinta formación, observando que se trata de un campo en el que puede tener cabida todavía un mayor número de profesionales.

Es importante resaltar que el proyecto no ha profundizado en el estudio de metodologías para la determinación de caudales ecológicos, lo que hubiera posibilitado obtener un producto comercializable con resultados contrastados.

Además, le ha faltado abordar o profundizar más en diferentes estudios en relación con la geotecnia, la teledetección, la capacidad de autodepuración de suelos y los diferentes métodos de retención del caudal de las avenidas y gotas frías desde las cabeceras de cuencas. Estos son diferentes frentes a explotar en el futuro, así como los aspectos económicos.

En resumen, la gestión de la recarga, recarga artificial de acuíferos o MAR son técnicas útiles, fiables, baratas y que precisan una mayor divulgación para su aplicación generalizada. Es necesario acercar las actuaciones tanto a la población en general, a los políticos, regantes, etc. Éstos últimos tienen una gran relevancia porque pueden ser los primeros beneficiados, ya que el 80% del consumo del agua en España se dedica al regadío. Por ello hay que involucrar a las Comunidades de Regantes en la técnica MAR, sobre todo en aquellas que se abastecen con aguas subterráneas. Pero para lograr este objetivo es necesario el apoyo político de organismos como ayuntamientos, comunidades autónomas y de los gobiernos de las naciones.

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- Acreman, M. (2000). "Hidrología de los humedales." Medwet nº 10. Conservación de humedales mediterráneos. Tour du Valat, Arlés, Francia.
- Aguilera, K. (1994). "Agua, economía y medio ambiente: interdependencias físicas y necesidades de nuevos conceptos". Revista de Estudios Agrosociales, 42-167.
- Armayor, J.L, de la Orden, J.A. y Murillo, J.M. (2001). "Artificial recharge as a technique to alleviate the overexplotation of small aquifers located on the Spanish Mediterranean coast". In: Proceedings of the 3rd International conference Future Groundwater Resources at Risk. Ed. L. Ribeiro. Pp. 623-631
- Armayor, J.L., Murillo, J.M. y Martínez, R. (2001). "Factores hidrometeorológicos y determinación de excedentes hídricos potencialmente utilizables en la operaciones de recarga artificial de acuíferos." Revista Hidropres de tecnología y gestión del agua nº 32. Diciembre de 2001.
- Armenter Ferrando, J.L. (2006). "La recarga artificial de acuíferos en la gestión conjunta de los recursos del río Llobregat." Agua y Ciudad en el ámbito mediterráneo (AQUAinMED). Memoria de las jornadas celebradas en Málaga del 24 al 28 de abril de 2006. Edita: IGME, serie hidrología y Aguas Subterráneas, nº 19.
- Arrojo, P. (2000). "Valoración de las aguas subterráneas en el marco económico general de la gestión de aguas en España." Papeles de Aguas Subterráneas (PAS), Serie B. Fundación Marcelino Botín.
- Barbieri, M. (2006). "El proyecto GABARDINE y el estudio de recarga artificial de acuíferos mediante balsas de infiltración en el sitio piloto de El Papiol (Baix Llobregat)". Universitat Politécnica de Catalunya.
- Bichara, A.F. (1986). "Clogging of recharge wells by suspended solids." American Society of civil engineers. Journal of irrigation and drainage division, Vol. 112, nº 3. pp 210-224.
- BOE (2003). Resolución de 28 de enero de 2003, de la Secretaría General de Medio Ambiente, sobre la evaluación de impacto ambiental del proyecto de conducción y recarga del acuífero de S'Estremera, en Mallorca (Baleares), de la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. BOE 45/2003 de 28 de enero de 2003.
- BOE. (1998). Real Decreto 1664/1998, de 24 de julio, por el que se aprueban los Planes Hidrológicos de cuenca.
- BOE. (2001). Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional. (BOE. nº 161, de 6 de julio de 2001, corrección de errores BOE. nº 184, de 5 de julio de 2001).
- BOE. (2002). Real Decreto 329/2002, de 5 de abril, por el que se aprueba el Plan Nacional de Regadíos (BOE núm. 101, de 27 de abril de 2002).
- BOE. (2005). Resolución de 7 de marzo de 2005, de la Secretaría General para la Prevención de la Contaminación y del Cambio Climático, sobre la evaluación de impacto ambiental del proyecto «Recarga artificial de un pozo profundo en «La Cabaña» Campo de Pozos Canal del Oeste, en el término municipal de Pozuelo de Alarcón (Madrid)» del Canal de Isabel II en el ámbito de la Confederación Hidrográfica del Tajo. BOE 91/2005 de 16 de abril de 2005.
- BOR. (1981). "Proyecto de presas pequeñas (Design of small dams)." Bureau de Reclamation. Editorial Dossat. Madrid.

- Bouwer, H, Rice, R.C. (2001). "Capturing flood waters for artificial recharge of groundwater." Proc 10th Biennial Symp Artificial Recharge of Groundwater, Tucson, Arizona, Arizona Hydrological Society, Pág. 99–106.
- Bouwer, H. (1999). "Artificial recharge of groundwater: systems, design, and management." In: Mays LW (Ed.) Hydraulic design handbook. McGraw-Hill, New York, pp 24.1–24.44
- Bouwer, H. (2002). "Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering." Hidrogeology Journal, volume 10, nº 2, April 2002.
- Cano-Manuel, J. y González Ayestarán, R. (2000). "Las acequias de Sierra Nevada. Base de datos de las principales acequias de Sierra Nevada". Parque nacional de sierra Nevada. Organismo Autónomo de Parques Nacionales.
- CMMAD (1988). "Nuestro Futuro Común". Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo. Alianza Editorial, Madrid.
- CMR-UICN (2000). Represas y Desarrollo: Un Nuevo Marco para la Toma de Decisiones. Informe de la Comisión Mundial de Represas. Noviembre de 2000. http://www.dams.org
- Cook, M.C y Moncaster, S. (1998). "ASR feasibility testing of the semi-confined Cretaceous Chalk aquifer of South Essex, England." Artificial recharge of groundwater, Peters, J.H. (Ed) Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Amsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Rotterdam.
- Custodio, E y Llamas, M.R. (1983). "Hidrología Subterránea." Ed. Omega. Barcelona. 2 Vols. 1-2450.
- David G y Pyne, R. (1995). "Groundwater recharge and wells. A Guide to Aquifer Storage Recovery." Lewis Publishers. CRC Press. Boca Ratón, Florida, USA. 376 Pág.
- David G y Pyne, R. (1998). "Aquifer storage recovery: Recent developments in the United States." Artificial recharge of groundwater, Peters, J.H. et al. (Ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Amsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Rotterdam.
- De Bries, J. y Simmers, I. (2002). "Groundwater recharge: an overview of processes and challenges." Hydrogeology Journal Vol. 10, nº 1. FEB 2002. AIH-SPRINGER.
- De la Orden, J.A. (2005). Estudio de la Recarga artificial en la Plana de Gandia-Denia. Diseño de una instalación a nivel industrial. Tesis doctoral. ETSI Minas. Universidad Politécnica de Madrid.
- De la Orden, J.A. (2006). "Recursos hídricos no convencionales". I Curso de Hidrogeología Aplicada, Ilustre Colegio Oficial de Geólogos. Madrid.
- De La Orden, J.A, López-Geta, J.A. y Murillo, J.M. (2003). "Experiencias de recarga artificial de acuíferos realizadas por el IGME en acuíferos detríticos." Boletín Geológico y Minero. Volumen 114, nº 2, abril-junio de 2003. I.G.M.E- M.C.T.
- De los Cobos, G. (2002). "The aquifer recharge system of Geneva, Switzerland: a 20 year successful experience." Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH. The Netherlands.
- Díaz-Marta, M. (1989). "Esquema histórico de la ingeniería y la gestión del agua en España." Revista de OP nº 13, España y el Agua I. Otoño 1989. Pág.8-23.

- Dillon, P.J. y Liggett, J.A. (1983). "An ephemeral stream-aquifer interaction model." Water Resour Res 19(3):621–626.
- Dillon, P.J. (1996). "Economics of ASR: System and users perspective." Aquifer Storage and Recovery. Centre for Groundwater Studies. Adelaide, Australia.
- Domenico, P.A. (1972). "Concepts and models in groundwater hydrology." McGraw Hill, New York.
- Domenico, P.A. y Schwartz F.W. (1990). "Physical and chemical hydrogeology." John Wiley & Sons. New York.
- Dragun, J. (1988). "Soil chemistry of hazardous materials." Hazardous materials Control Research Institute. Silver Springs, MD, 1988.
- Esteller Alberich, M.V. (1993). "Consideraciones sobre el aprovechamiento de los recursos hídricos en la plana de Castellón. Utilización de aguas residuales para riego". Tesis doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada.
- EWRI-ASCE. (2001). "Water Resources Planning & Management." World Water Resources & Environmental Resources Congress. Orlando, Florida. May 20-24, 2001. EURI-ASCE. American society of civil engineers. ASCE/EWRI Standards Committee for Artificial Recharge.
- Fernández Escalante, A.E. (2005). "Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales. Aspectos cualitativos y medioambientales. Criterios técnicos derivados de la experiencia en la Cubeta de Santiuste (Segovia)". Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Enero de 2005.
- Fernández Escalante, A.E. y García Rodríguez, M. (2004). "La recarga artificial de acuíferos. Marco legal que regula sus aplicaciones". VIII Simposio de Hidrogeología. AEH-IGME. Octubre de 2004.
- Fernández Escalante, A.E. y García Rodríguez, M. (2004). "Proposición de un sistema de caracterización de humedales degradados susceptibles de regeneración hídrica mediante operaciones de recarga artificial de acuíferos". VIII Simposio de Hidrogeología. El agua. Esencia ambiental. AEH-IGME. Octubre de 2004.
- Fernández Escalante, A.E. y García Rodríguez, M. (2004). "Proposición de una clasificación de humedales en base a su susceptibilidad para ser restaurados mediante operaciones de recarga artificial de acuíferos. Aplicación al sistema de humedales de Coca-Olmedo". VIII Simposio de Hidrogeología. Zaragoza. AEH-IGME. Octubre de 2004.
- Fernández Escalante, A.E y García Rodríguez, M. (2006). "Descripción de indicadores medioambientales para la evaluación de impacto ambiental, seguimiento y control de la restauración de humedales mediante técnicas de recarga artificial de acuíferos. (Segunda parte: indicadores de respuesta)". Revista Tecnología y Desarrollo. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Volumen IV. Año 2006. Universidad Alfonso X el Sabio de Madrid.
- Fernández Escalante, A.E. y López, J. (2002). "Contribution to the hydrogeological knowledge of an artificial recharge area based on hydrochemical investigation. Los Arenales site, Duero basin, (Spain)." Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (Ed) Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH. The Netherlands.
- Fernández Escalante, A.E. y López, J. (2002). "Hydrogeological studies preceding artificial recharge of Los Arenales aquifer, Duero basin (Spain)". Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (Ed) Proceedings of the 4th

International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH. The Netherlands.

- Fernández Escalante, A.E. y Cordero Sánchez, R. (2006). "Esbozo de una estrategia para acercar la recarga artificial de acuíferos a la población mediante la educación ambiental". Revista ecosistemas, año XV, nº 1. Asociación española de ecología terrestre, Madrid.
- Fernández Escalante, A.E, García Rodríguez, M, Villarroya Gil, F. y Montero Fernández, J. (2005). "Propuesta de un sistema de indicadores medioambientales para la evaluación de impacto ambiental y seguimiento de actividades de regeneración hídrica mediante recarga artificial de acuíferos". Revista Tecnología y Desarrollo. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Volumen III. Año 2005. Universidad Alfonso X el Sabio. Escuela Politécnica Superior. Villanueva de la Cañada, (Madrid).
- Fernández Escalante, A.E, García, M. y Villarroya, F. (2005). "The "careos" from Alpujarra (Granada, Spain), a historical example of artificial recharge previous to XIII century applicable to the XXI century. Characterization and inventory". ISMAR 5 proceedings. 5th International Symposium on management of aquifer recharge. Berlín, 2005 (12-16 June).
- Fernández Escalante, A.E, García, M. y Villarroya, F. (2005). "Proposal for a system of environmental indicators to monitor and control artificial aquifers recharge operations based on case studies". ISMAR 5 proceedings. 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. Berlín. June 2005.
- Fernández Escalante, A.E, García, M. y Villarroya, F. (2005). "Proposal for a new classification of wetlands susceptible to recovery by means of artificial recharges of aquifers techniques. Application to the Coca-Olmedo wetlands complex, Duero basin (Spain)". ISMAR 5 proceedings. 5th International Symposium on management of aquifer recharge. Berlín, 2005 (12-16 June).
- Fernández Escalante, A.E, García, M. y Villarroya, F. (2005). "Seguimiento y control de la restauración de humedales mediante técnicas de recarga artificial de acuíferos a partir del diseño de un sistema de indicadores medioambientales". Revista Tecnología y Desarrollo. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Volumen III. Año 2005.
- Fetter, C.W. (1994). "Applied Hydrogeology." Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A. (1979). "Groundwater." Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 604 Pág.
- Galán, R, Fernández Escalante, A.E y Martínez, J. (2001). "Contribuciones al estudio hidrogeológico para la recarga artificial del acuífero de la Cubeta de Santiuste. (Segovia)." VII Simposio de hidrogeología, AEH, Murcia.
- Galán, R, López, F, Martínez, J, Macías, C, Galán, G. y Fernández Escalante, A.E. (2001). "Recarga artificial del acuífero de los Arenales en la comarca de "El Carracillo" (Segovia). Soporte físico." VII Simposio de hidrogeología, AEH, Murcia.
- García-Hernán, O. (1996). "Investigaciones, ensayos y experimentaciones en la recarga artificial de acuíferos detríticos con baja permeabilidad. Lebrija (Sevilla)". Tesis doctoral. UCM, 1996.
- Green WH y Ampt GA. (1911). "Studies on soil physics, I. The flow of air and water through soils." J Agric Sci 4:1–24.
- Grischek, T, Madeleidt, W y Nestler, W. (2002a). "River bed specifics and their effect on bank filtration efficiency." Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (Ed) Proceedings of the 4th International Symposium on

Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH. The Netherlands.

- Grischek, T, Schoenheinz, D, Worch, E. y Hiscock, K. (2002b). "Bank filtration in Europe- An overview of aquifer conditions and hydraulic controls." Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (Ed) Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH. The Netherlands.
- Haeffner, H, Detay, M y Bersillon, J.L. (1998). "Sustainable groundwater management using artificial recharge in Paris region." Artificial recharge of groundwater, Peters,J.H. et al.(Ed) Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Amsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Rotterdam.
- Hantke, H (1983). "Der Sickerschlitzgraben. Brunnenbau, Bau von Wasserwerken, und Rohrleitungsbau" (BBR): 34(6):207–208.
- Healy, R. y Cook, P. (2002). "Using groundwater levels to estimate recharge." Hydrogeology Journal Vol. 10, nº 1. Feb 2002. AIH-Springer.
- Hijnen, W. y van der Kooij, D. (1992). "The effect of low concentrations of assimilable organic carbon (AOC) in water on biological clogging of sand beds." Water Research, 26(7): 963-972.
- Huisman, L. y Olsthoorn, T.N. (1983). "Artificial Groundwater Recharge." Pitman, London (United Kingdom). 320 Pág.
- IGME. (2000d). "Identificación de acciones y programación de actividades de recarga artificial de acuíferos en las cuencas intercomunitarias." MCT.
- IRYDA. (1990). "Proyecto de Asistencia Técnica para el Estudio Hidrogeológico de la Cubeta de Santiuste (Segovia)." Documento técnico no publicado. IRYDA-ITGE.
- ITGE. (1991). "Tecnología básica de la recarga artificial de acuíferos." Serie: Lucha contra la contaminación.
- ITGE. (2000). "Recarga artificial de acuíferos." ITGE. Exma. Diputación Provincial de Alicante.
- ITGE. (2000). "Identificación de acciones y programación de actividades de recarga artificial de acuíferos en las cuencas intercomunitarias." ITGE. Ministerio de Ciencia y Tecnología (e.a. M.C.T).
- Johnson, A.I. (1967). "Specific yield. Compilation of specific yields for various materials." US Geol Surv Water-Supply Paper 1662-D, 74 Pág.
- Krul, W.F y Liefrinck, F.A. (1946). "Recent groundwater investigations in the Netherlands." Monograph on the progress of research in Holland. Elsevier, New York, 78 Pág.
- Laszlo, F. (2003). "The Hungarian Experience with Riverbank Filtration." Riverbank filtration: the future is now. Proceedings of the Second International Riverbank Filtration Conference. Melin, G. (Ed.). September 16-19, 2003. Cincinnati, Ohio. National Water Research Institute. Fountain Valley, California.
- Lerner, D.N. (1997). "Groundwater recharge." In: Saether OM, de Cariat P (editors). Geochemical Processes, weathering and groundwater recharge in catchments. AA Balkema, Rotterdam. Pág 109-150.
- Lerner, D.N, Issar, A.S. & Simmers, I. (1990). "Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural resource." IAH Int contribution Hydrogeology, 8. Heinz Heise, Hannover, 345 Pág.
- Llamas Madurga, M.R. (2000). "Impacto del olvidado papel de las aguas subterráneas en la política del agua de España". Comentarios para la Comisión de

Medio ambiente del Congreso de los Diputados en relación con la tramitación parlamentaria del Proyecto de Ley del plan Hidrológico Nacional. MIMAM. www.mma.es/secciones/agua/pdf/informesphncon/manuel_llamas_madurga.pdf

- Llamas Madurga, M.R. (2001). "Aguas subterráneas: retos y oportunidades." Fundación Marcelino Botín. Ediciones Mundi-prensa.
- Lluria, M.R, Gorey, T.L y Mack, R.B. (1991). "Hydrochemistry and chemical compositional changes of ground water from a deep well recharge operation using river water subjected to limited on-site treatment." Proc. of 5th Bieenial Symp. on Artificial Recharge of Groundwater, Tucson, Arizona (USA): 155-168.
- López Geta, J.A. y Murillo Díaz, J.M. (1995). "Recarga artificial de acuíferos. Experiencias realizadas por el Instituto Tecnológico Geominero de España". En: XI Congreso Latinoamericano de Geología. Venezuela.
- Madsen, B, Henriksen, H.J. y Knudby, C. (1998). "The national water ressource model developed for the assessment of the distribution and protection of the Danish groundwater resources." En Brahama et al. IAH/AIH joint conference Gambling with groundwater – physical, chemical and biological aspects of aquifer stream relations, Pág. 219 – 226.
- MAPA. (1999). "Estudio hidrogeológico complementario para la recarga artificial en la Cubeta de Santiuste (Segovia)." Informe técnico no publicado. Secretaría General de Desarrollo Rural-Tragsatec. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- MAPA. (1999). "Anteproyecto de recarga del acuífero de la Cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia)." IRYDA.
- MAPA. (1999). "Proyecto de recarga del acuífero de la Cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia)." Informe técnico no publicado. Secretaría General de Desarrollo Rural-Tragsatec.
- MAPA. (2000). "Proyecto de A.T. Gestión de los Recursos Hídricos del Acuífero de Los Arenales, Carracillo (Segovia)." Dirección General de Desarrollo Rural-TRAGSATEC (no publicado).
- MAPA. (2005). "Asistencia técnica para el seguimiento y modelización de la recarga artificial en la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia)". Dirección General de Desarrollo Rural-TRAGSATEC (no publicado).
- MAPA. (2005). "Asistencia Técnica para la gestión de los recursos hídricos en el acuífero de Los Arenales, comarca de "El Carracillo" (Segovia)" Dirección General de Desarrollo Rural-TRAGSATEC (no publicado).
- Martín-Alonso, J. (2003). "Combined Use of Surface Water and Groundwater for Drinking Water Production in the Barcelona Metropolitan Area." Riverbank filtration: the future is now!. Proceedings of the Second International Riverbank Filtration Conference. Melin, G. (Ed.). September 16-19, 2003. Cincinnati, Ohio. National Water Research Institute. Fountain Valley, California.
- Menció, A, Mas-Pla, J. y Vilanova, E. (2003). "Análisis de las posibilidades de la recarga artificial de aguas residuales en el contexto hidrológico de la cuenca del río Onyar (Cuencas internas de Cataluña)." Presente y futuro del agua subterránea en España y la Directiva Marco del agua. Medidas de corrección. Zaragoza, 20-22 de noviembre de 2002. IGME.
- Meyboom, P. (1966). "Unsteady groundwater flow near a willow ring in a hummocky moraine." J Hydrol 4:38–62.
- Meyboom, P. (1967). "Mass transfer studies to determine the groundwater regime of permanent lakes in hummocky moraine of western Canada." J Hydrol 5(2):117–142.

- Miettinen, I, Lehtola, M, Vartiainen, T. y Martikainen, P. (2003). "Microbial Regrowth in Artificially Recharged Groundwater: Experiences from a 4-Year Project." Riverbank filtration: the future is now!. Proceedings of the Second International Riverbank Filtration Conference. Melin, G. (Ed.). September 16-19, 2003. Cincinnati, Ohio. National Water Research Institute. Fountain Valley, California.
- MIMAM. (2000). "Libro Blanco del Agua en España 2000 (LBAE)." MIMAM. Madrid. 637 Pág.
- MIMAM. (2002). "Estudio del sistema de utilización conjunta de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de las cuencas del Cega-Pirón y del Adaja-Eresma." MIMAM-PROINTEC.
- MIMAM-MCYT (2000). "Identificación de acciones y programación de actividades de recarga artificial de acuíferos en las cuencas intercomunitarias". 57 Pág.
- Mintz, D.M. (1964). "Theoretical principles of water purification." Building and Construction Publ., Moscow (in Russian).
- Moench, A.F. (1994). "Specific yield as determined by type-curve analysis of aquifer-test data." Groundwater 32:949–957.
- Montgomery, H. (1987). "U.K. Experience in the ground water recharge of threated sewage: Potential for irrigation purposes." Irrig. & Drainage Eng.
- MOPTMA.-MINER (1994)."Libro Blanco de las Aguas Subterráneas (LBAS)." Serie Monografías. Secretaría General Técnica del Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.
- Murillo Díaz, J.M. (2003). "Recarga de acuíferos evaluación y análisis de condicionantes técnicos y económicos. Acuífero aluvial del bajo Guadalquivir". Tesis Doctoral. E.T.S.I. MINAS, Universidad Politécnica de Madrid.
- Murillo, J.M, de la Orden, J.A. y Rodríguez, L. (2001). "La recarga artificial como técnica de recuperación de acuíferos contaminados. Aplicación a la Plana de Vergel (Alicante)." IGME.
- Murillo, J.M, de la Orden, J.A, Armayor, J.L. y Castaño, S. (1999). "La recarga artificial de acuíferos". IGME y Diputación provincial de Alicante.
- Neuman, S.P. (1972). "Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table." Water Resour Res 8:1031–1045.
- Nwankwor GI, Cherry JA, Gillham RW (1984). "A comparative study of specific yield determinations for a shallow sand aquifer." Groundwater 22:764–772.
- Olsthoorn, T.N. y Mosch, M.J. (2002). "Fifty years artificial recharge in the Amsterdam dune area." Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (Ed) Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH. The Netherlands.
- OMS. (1989). "Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en Agricultura y Acuicultura." Informe de un Grupo Científico de la Organización Mundial de la Salud (e.a. OMS.). Ginebra 1989. Serie de Informes Técnicos 778. http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind53/dis/dis.html.
- Pachón, D, Martín Machuca, M, Murillo, J.M. y López-Geta, J.A. (2001). "La instalación piloto de recarga artificial de "Los Sotillos" (Cádiz)". V Simposio sobre el agua en Andalucía, Almería, 25 - 28 de septiembre 2001. Vol. 1.
- Pavelic. P. y Dillon, P. (1996). "The impact of two seasons of stormwater injection on groundwater quality in South Australia." Proc. of the Internat. Symp. on Artificial Recharge of Groundwater (Helsinki, Finland): 105-110. Edited by A-L. Kivimaki and T. Suokko.

- Pérez-Paricio, A. (2000). "Integrated modelling of clogging of artificial recharge systems." Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Pérez-Paricio, A, Benet, I, Ayora, C, Saaltink, M. y Carrera, J. (2000). "CLOG: A code to address the clogging of Artificial Recharge systems." Simposio international: Computer Methods for Engineering in Porous Media, Flow and Transport, 28/9 al 1/10 de 1998. Giens (Francia). Ed.: J.M. Crolet.
- Peters, D.G. (1966). "Standard Methods of Chemical Analysis." F. J. Welcher, Ed., Van Nostrand, Princeton, New Jersey, sixth edition, Volume III, Part A, pp. 404–427.
- Peters, J.H., et al. (1998). "Artificial Recharge of Groundwater." Editor of the Proc. of the Third Int. Symp. on Artificial Recharge of Groundwater *(TISAR)*. 21-25 September 1998, Amsterdam. Publ. by A.A. Balkema (Rotterdam, the Netherlands).
- Prickett, T.A. (1965). "Type-curve solution to aquifer tests under water-table conditions." Groundwater 3:5–14.
- Ryan, J.N. y Elimelech, M. (1996). "Colloid mobilization and transport in groundwater". Colloids and Surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects, 107: 1-56.
- Rubio, J.C, Gollonet, J, Gonzalez-Ramón, A, Luque, J.A. (1995). "Resultados de la experiencia de recarga artificial seguida por el ITGE en el acuífero de Mancha Real". En: IV Simposio Nacional de Hidrogeología. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos, Vol. XXI. Pág. 147-157.
- Salgot de Margay, M. (1980). "Estudio acerca de la posibilidad de reutilización de las aguas residuales depuradas de la Costa Brava, Gerona". Tesis doctoral. Facultad de Farmacia, Universidad de Barcelona.
- Sandlund, O.T, y Viken, Å. (Eds.) (1997). "Report from Workshop on Freshwater Biodiversity." Selbu, Norway, 5.-7. June 1997. The Trondheim Conferences on Biodiversity.
- Schicht, R.J. y Walton W.C. (1961). "Hydrologic budgets for three small watersheds in Illinois." Illinois State Water Surv Rep Invest 40, 40 Pág.
- Schippers, J.C, Verdouw, J y Zweere, G.J. (1995). "Predicting the clogging rate of artificial recharge wells." Journal of Water Supply Research and Technology -Aqua (Oxford), 44(1): 18-28.
- Silgado, A, Román, J, Martín, M. y Mantecón, R. (2002). "Uso eficiente del agua en cuencas optimización de la gestión de los recursos hidráulicos mediante la recarga artificial. Experiencias en la cuenca del Guadalquivir." Internet: http://www.unesco.org.
- Sophocleous, M. (1991). "Combining the soil water balance and water-level fluctuation methods to estimate natural groundwater recharge: practical aspects." J Hydrol 124:229–241 (STATSGO) data base, data use information. Misc Publ 1492, NRCS, Fort Worth, Texas.
- Sophocleous, M. (2002). "Interactions between groundwater and surface water: the state of the science." Hydrogeology Journal Vol. 10, nº 1. Feb 2002. AIH-Springer.
- Stuyfzand, P.J. (1993). "Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands." Ph.D. Thesis, edited by Kiwa. ISBN 90-74741-01-0, 366 pp.
- Stuyfzand, P.J. (1998). "Quality changes upon injection into anoxic aquifers in the Netherlands: Evaluation of 11 experiments." Artificial recharge of groundwater, Peters, J.H. et al (Ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Amsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Rotterdam.

- Stuyfzand, P.J. (2002). "Quantifying the hydrogeochemical impact and sustainability of artificial recharge systems." Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (Ed) Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH. The Netherlands.
- Stuyfzand, P.J. (2002). "Modelling the accumulation rate and chemical composition of clogging sludge layers in recharge basins with Easy-Leacher ® 4.6." Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (Ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH. The Netherlands.
- Theiss, T.L y Singer, P.C. (1974). "Complexation of iron (II) by organic matter and its effect on iron (II) oxygenation." Environm. Sci. and Technol, 8(6): 569-573.
- Tuinhof, A y Heederik, J.P. eds. (2002). "Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage. Making Better Use of Our Largest Reservoir." Papers of Seminar Wageningen. 18 - 19 December 2002. Netherlands National Committee for the IAH in cooperation with Netherlands Hydrological Society.
- Tuinhof, A, Olsthoorn, T, Heederik, J.P y de Vries, J. (2004). "Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage. A promising option to cope with increasing needs." Netherlands National Committee for the IAH in cooperation with Netherlands Hydrological Society.
- UPV (2001). "Aquatool. Sistema soporte de decisión para la planificación y gestión de recursos hídricos". www.upv.es/aquatool/.
- Van der Kooij, D, Vrouwenvelder, H.S. y Veenendaal, H.R. (1995). "Kinetic aspects of biofilm formation on surfaces exposed to drinking water." Water Sci. Tech, 32(8): 61-65.
- Valdés, J.L. (1992). "Experiencias de recarga artificial en los acuíferos del Río Llobregat y Río Besòs." Aguas de Barcelona (AGBAR), Barcelona.
- Van Duijvenbode, S.W y Olsthoorn, T.N. (2002). "A pilot study of deep-well recharge by Amsterdam Water Suply." Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (Ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH. The Netherlands.
- Veihmeyer, F.J y Hendrickson, A.J. (1931). "The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils." Soil Science 32:181–194.
- Villarroya, F. (2002). "El marco de la Directiva Marco." Jornadas técnicas sobre la gestión y el control del agua frente a la Directiva Marco. UAM-CY-II.
- Winter, T.C, Harvey J.W, Franke, O.L y Alley, W.M. (1998). "Groundwater and surface water. A single resource." US Geological Survey. Circ 1139.

- http://www.cgwaindia.com/success.htm
- http://www.earthetc.com/ecwearth/asps/ecwearth_frame.asp?Image=geodetic/world/landsat742
- http://www.iah.org/recharge
- http://www.csir.co.za, 2002
- http://www.dams.org/report/
- http://www.mcu.es/TESEO/teseo.html
- http://www.aguas.igme.es/igme/publica/libro47/lib47.htm
- http://www.wwf.es/aguas_politica_phn.php

ANOTACIONES

OTROS TÍTULOS DE LA SERIE

Título 1:

LOS HIDROGRAMAS Y OTROS SISTEMAS DE REPRESENTACIÓN DEL QUIMISMO DE LAS AGUAS

Título 2:

LA CALIDAD DE LAS AGUAS EN FUNCIÓN DE SU USO

Título 3:

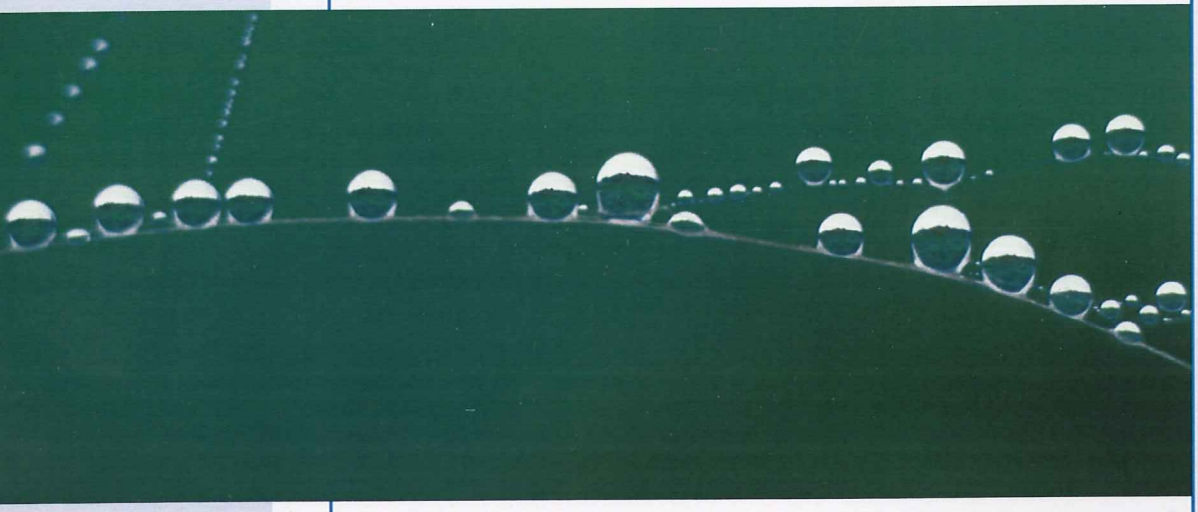
GESTIÓN DE LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS (M.A.R.)

Título 4:

TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DE SUELO Y ACUÍFERO (S.A.T.) APLICADAS A LA GESTIÓN DE LA RECARGA

Título 5:

CAMINITOS DE AGUA. TRES RUTAS HIDROGEOLÓGICAS EN LA PROVINCIA DE SEGOVIA.
GUÍA DE INTERPRETACIÓN



DINA-MAR cuenta con el apoyo de:

ISBN 846145123-6