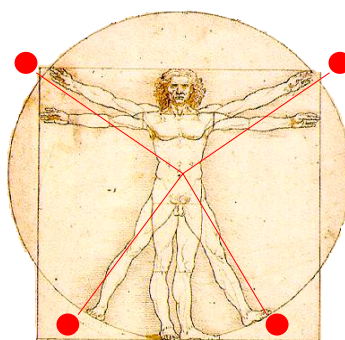


TECNOLOGÍ@ y *DESARROLLO*

Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

VOLUMEN IV. AÑO 2006
SEPARATA



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)

A. Enrique Fernández Escalante y Manuel García Rodríguez



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO
Escuela Politécnica Superior
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: A. Enrique Fernández Escalante y Manuel García Rodríguez.
Diciembre, 2006.

http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECEOC06_003.pdf

© De la edición: *Revista Tecnologi@ y desarrollo*.

Escuela Politécnica Superior.

Universidad Alfonso X el Sabio.

28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).

ISSN: 1696-8085

Editor: Julio Merino García, tecnologia@uax.es

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

Tecnologi@ y desarrollo. ISSN 1696-8085. Vol.IV. 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)

A. Enrique Fernández Escalante⁽¹⁾, Manuel García Rodríguez⁽²⁾

(1) Dr. CC. Geológicas. TRAGSATEC. Julian Camarillo 6ºB. 28037 Madrid. Tf: 91 3226106. Fax: 91 3226005. Email: efe@tragsatec.es

(2) Dr. CC. Geológicas. Departamento de Tecnología Industrial. Escuela Politécnica Superior. Universidad Alfonso X el Sabio. Avenida de la Universidad nº 1. Villanueva de la Cañada C.P. 28691. Madrid. Tf. 918109780. E-mail: manugaro@uax.es

RESUMEN: En este artículo se describen detalladamente los indicadores de respuesta propuestos en un sistema de indicadores medioambientales parametrizado. El sistema ha sido diseñado para la evaluación de impacto ambiental (EIA) y está especialmente indicado para elementos clave, tales como humedales degradados en proceso de restauración. Las labores de regeneración hídrica a que son sometidos se basan en técnicas de bajo impacto, en especial la recarga artificial de acuíferos. La propuesta complementa el sistema que se presenta en un artículo anterior de la revista [Tecnología y desarrollo](#).

PALABRAS CLAVE: Recarga artificial de acuíferos, indicadores medioambientales, evaluación de impacto ambiental (EIA), sistema PER, indicadores de respuesta, regeneración hídrica, humedales.

ABSTRACT: In this article are described in detail the response environmental indicators included in a PSR system. This system has been designed for the environmental impact assesment (EIA) and is specially indicated for key elements, such as degraded wetlands in restoration processes. The hydric regeneration works employed are inspired in low impact techniques, specially managed aquifer recharge (MAR). The proposal complements the article of the previous number of the T&D scientific magazine.

KEY-WORDS: *Artificial recharge of aquifers, enviromental indicators, environmental impact assesment, PSR system, response indicators, hydric regeneration, wetlands.*

SUMARIO: 1. Introducción, 2. Metodología, 3. Diseño de un sistema de indicadores medioambientales de respuesta, 4. Discusión, 5. Conclusiones, 6. Agradecimientos, 7. Bibliografía.

1. Introducción

Este artículo se presenta con objeto de aportar el sustrato teórico y las normas para la correcta aplicación del sistema de evaluación de impacto ambiental (EIA) propuesto en el artículo previo de título “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” (ref. TECEOC05_004) de la revista [Tecnologí@ y desarrollo](#) (Fdez. Escalante *et al*, 2005a). En dicho artículo se proponía un sistema para la evaluación y seguimiento de humedales basado en indicadores medioambientales, que son sometidos a un sistema de ponderación de rangos-pesos para, por último, ser relacionados por medio de un variograma o polígono de evaluación multicriterial, aportando además un valor numérico del “estado ecológico” del humedal o elemento clave. Incluía también algunos ejemplos de aplicación del método propuesto en humedales susceptibles de regeneración hídrica mediante operaciones de recarga artificial de acuíferos (Fdez. Escalante y García, 2004, Fdez. Escalante *et al*, 2005a, b y c), en concreto las lagunas de las Eras y de la Iglesia (González Bernáldez, 1989; Fdez. Escalante, 2005), del Complejo Coca-Olmedo (Rey Benayas, 1991), en Villagonzalo de Coca (Segovia).

Los indicadores de respuesta que se proponen y definen en este artículo son una readaptación del sistema presentado en la tesis del primer autor (Fdez. Escalante, 2005), cuyo seguimiento y adaptación ha sido posible gracias al proyecto de investigación del Grupo Tragsa 00/13223.

2. Metodología

Metodológicamente, el diseño de indicadores medioambientales empleado se apoya en el sistema PER (Friends & Raport, 1979), 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 (CMA-JA, 2002).

La relación de indicadores empleados, así como las características de cada uno de ellos a tener en cuenta a la hora de aplicar el método, fue presentada en la primera parte de este artículo, así como el marco teórico preciso.

El objeto del presente artículo se limita a presentar la nueva propuesta basada en la experiencia de cuatro ciclos de operatividad de los dispositivos de recarga artificial de acuíferos (en adelante AR) en la Cubeta de Santiuste, laboratorio experimental donde se están estudiando los procesos, y especialmente, tras un año de ensayos de regeneración hídrica de humedales mediante técnicas de AR, puesto que durante el invierno de 2006 se derivó un caudal del dispositivo de recarga artificial de acuíferos a la laguna de la Iglesia de Villagonzalo de Coca, aumentando así su estado ecológico, inicialmente muy degradado. De este modo ya se ha podido constatar la efectividad de los indicadores de respuesta inicialmente diseñados en base a previsiones, si bien algunos requerirán un periodo de observación más amplio.

3. Diseño de un sistema de indicadores medioambientales de respuesta

Los indicadores de respuesta indican el nivel de esfuerzo social y político en materia ambiental y de recursos. Se evalúan por las decisiones y actuaciones que los agentes económicos y ambientales realizan para proteger el medio ambiente. Permiten valorar las medidas agroambientales aplicadas conjuntamente con las actividades de recarga artificial. Son por tanto, acciones que provocan una mejora del estado.

Su aplicación precisa de una entidad u organismo que financie las actuaciones, generalmente las Comunidades Autónomas o la Administración General del Estado.

En estadios iniciales de aplicación del sistema, gran parte de los indicadores carecen de validez, simplemente por no poder reflejar la realidad de unos dispositivos o actuaciones en proyecto o pendientes de construcción o aplicación. Asimismo, el empleo de esta tipología de indicadores puede ser aceptado o rechazado en el proceso de seguimiento del indicador en sus primeros estadios.

Tras cuatro ciclos de actividad en el escenario natural donde se está estudiando la efectividad de los indicadores, se han rechazado algunos de los indicadores diseñados inicialmente (Fdez. Escalante, 2005), adoptando otros más idóneos y más apoyados en el carácter cambiante y dinámico del medio físico.

En este apartado se presenta un sistema de indicadores diseñado en base a criterios básicos de ingeniería ambiental que, en principio, parecen apropiados para el fin

6. Enrique Fdez. Escalante y Manuel García Rodríguez

pretendido. Si bien, con seguridad precisarán ciertas modificaciones y actualizaciones hasta poder considerarse “definitivos”.

En la tabla 1 se presentan los 15 indicadores “prediseñados” y una estimación del baremo para aplicar un sistema de rangos-pesos, al igual que se llevó a cabo con la aplicación EI-MAR para la evaluación de impactos acumulativos, sinergismos, etc. Como ya se ha indicado, dado que en este periodo es temprano para su aplicación, estos deberán ser modificados con mayor probabilidad que los de estado y presión.

INDICADOR	RANGO	PESO	FACTOR CORRECTOR	UNIDADES
1.-Evolución de las dimensiones del caz de recarga.	1	1	No aplica	$\pm \Delta \text{cm}$
2.-Aterramiento de canales, presas, cauces artificiales y/o naturales, etc.	1	1	No aplica	$\pm \Delta \text{cm}$
3.-Aumento de la erosión y acarcavamiento de los taludes y área de influencia.	1	2	No aplica	t/año
4.-Diferencias de cota y pendientes.	1	2	No aplica	$2 \pm \Delta \text{cm}$
5.-Alteraciones en los parámetros hidrogeológicos.	1	2	>1orden magnitud: x2	$\pm K, S \text{ y } T$
6.-Colmatación de los dispositivos, taludes y descenso de la permeabilidad del lecho.	1	4	Dif. >10 %: x3	$\pm \Delta \% \text{ finos}$
7.-Concentración de oxígeno disuelto en los piezómetros de observación de la red de control de la recarga y relación con hierro y nitratos en disolución (isorrelaciones iónicas).	1	2	No aplica	$\pm \Delta \text{O}_2$ (ppm) R.I. Fe/O ₂ y NO ₃ /O ₂
8.-Evolución de la calidad del agua subterránea por el uso de fertilizantes nitrogenados en el regadío*.	1	1	No aplica	$\pm \Delta \text{NO}_3$ (ppm)
9.-Concentración en carbonato en las aguas de recarga.	1	1	No aplica	$\pm \Delta \text{CO}_3^-$ (ppm)
10.-Afección en cultivos dentro del área de influencia*.	1	1	No aplica	€/ año
11.-Afección a vegetación nativa en el área de influencia.	1	2	No aplica	P/A
12.-Variaciones en las condiciones ecológicas en los humedales.*	1	1	No aplica	P/A
13.-Variaciones en el nivel del agua del cuenco en los humedales o del nivel freático en criptohumedales*.	1	1	No aplica	$\pm \Delta \text{cm}$
14.-Reducción del consumo indebido de agua.*	1	1	No aplica	$\pm \Delta \%$ pérdidas
15.-Balance de nutrientes en el regadío.	1	1	No aplica	$\pm \Delta \%$ sobrecargas
TOTAL				

Tabla 1. Propuesta para el cálculo del “estado de presión” a partir del sistema de rangos-pesos sobre los indicadores de respuesta. (*) El impacto ambiental puede resultar positivo.

Seguidamente se describen los indicadores inicialmente adoptados de la tabla 1.

R-1) Evolución de las dimensiones del caz de recarga artificial

Algunos parámetros constructivos suelen verse afectados durante las labores de AR, como, por ejemplo, la superficie de infiltración. Esta varía a medida que aumenta o disminuye la altura de la lámina de agua, que humedece y seca los taludes del dispositivo, propiciando desprendimientos, variaciones en la profundidad de la zanja o foso por la acumulación de depósitos colmatantes en el fondo, las pendientes del talud por erosión directa, etc.

La velocidad del agua también ha sido un factor determinante en la estabilidad de los taludes del foso, especialmente en zonas con presencia de fuertes curvaturas, tendiendo a erosionar la zona donde impactan las aguas con mayor velocidad. Otros factores externos que influyen en la estabilidad de los taludes son el tránsito de vehículos por la vía de servicio, precipitaciones e impacto de la gota de lluvia, fenómenos de hinchamiento por congelación, etc.

Este indicador puede ser representativo de la cantidad de horas de maquinaria que deben ser empleadas para las labores de mantenimiento, siendo, por tanto, un parámetro de gestión y de ayuda a la toma de decisiones.

El diseño del indicador está basado en el número de puntos con incidencias detectadas en una inspección visual durante el ciclo de AR al menos una vez por mes, labor que se está llevando a cabo coincidiendo con la medición de la piezometría en el sistema.

R-2) Aterramiento de canales, presas, cauces artificiales y/o naturales, etc.

Se trata de un indicador similar al anterior en cuanto a funcionamiento y finalidades. Su determinación resulta relativamente fácil mediante la medición directa del espesor de arenas sobre el fondo de las estructuras, especialmente junto a las paradas (dispositivos de hormigón de retención de la velocidad del agua para favorecer la infiltración) y dispositivos de disipación de la energía y de remanso de las aguas.

En el primer ciclo de AR en la zona de estudio no se llevaron a cabo medidas de este tipo, si bien desde marzo de 2004 se han comenzado a realizar determinaciones de este

parámetro. La construcción de un nuevo caz que ha comenzado su operatividad en el ciclo 2005/06 (la concesión de la Confederación hidrográfica del Duero va del 1 de noviembre al 1 de mayo, si bien puede haber modificaciones según el carácter hidrológico de cada año) ha requerido ampliar la zona de inspección visual y complicado la efectividad del indicador, al discurrir las aguas simultáneamente por dos canales diferentes.



Figuras 1 a) y b). Aspecto del fondo de una balsa de infiltración con generación de procesos colmatantes (bioclogging).

R-3) Aumento de la erosión y acarcavamiento de los taludes y área de influencia

La desnudez de vegetación que tienen las estructuras y dispositivos de AR, así como los humedales “objetivo” conlleva ciertos incrementos del efecto de la erosión por impacto de la gota de lluvia, eólica, etc. En general, la erosión actúa en los taludes, y los sedimentos van a parar al fondo del dispositivo de AR, lo que permite apreciar una mezcla de *cake* y arena en el fondo del dispositivo al término de cada ciclo de AR.

La cuantificación de este impacto puede ser llevada a cabo mediante indicadores convencionales, como es la aplicación de la ecuación de emisión media anual de sedimentos o Coeficiente de emisión de Williams para cuantificar el movimiento de tierras (Williams, 1993; Williams & Berndt, 1977). Esta ecuación ha sido aplicada con buenos resultados para el cálculo de la colmatación del cuenco lagunar en determinados humedales (CMA JA, 2002) con ligeras modificaciones que se describen a continuación:

- Emisión media anual de sedimentos. Coeficiente de emisión de Williams:

El coeficiente, aplicado a la erosión que se produce en una cuenca, da la parte de esa erosión que se emite como media anual por la desembocadura. Su expresión es la siguiente (ec.1):

$$CE = 1,366 \cdot 10^{-11} A^{-0,0998} R^{0,3629} CN^{5,444}$$

(ec.1)

Donde:

- CE es la parte de la erosión total anual (t/año) que se produce en una cuenca o unidad hidrológica que es emitida por la desembocadura del cauce que recoge la escorrentía de esa unidad hidrológica. Su valor no puede ser superior a 1. Aunque matemáticamente CE si puede tener un valor superior a 1, en este caso se atribuirá el valor superior admisible (1) para realizar el cálculo de la emisión media anual (t/año).
- A, el área de la cuenca en km².
- R, relación desnivel/longitud hidráulica, en km.
- CN, número de curva.

Esta ecuación dimensiona las variaciones en colmatación, tanto del cuenco lagunar como de las orlas perimetrales e incluso de la subcuenca hidrográfica. Cada cuenco lagunar debe ser atribuido a su microcuenca endorreica.

Los valores de la erosión total anual en cada cuenca o UH pueden ser calculadas mediante el método USLE/MUSLE.

La USLE modificada (MUSLE) puede aplicarse a una cuenca si las fuentes de sedimentos están uniformemente distribuidas por la misma y si las subcuencas tributarias más importantes son hidráulicamente semejantes. Al aplicar el modelo a las unidades hidrológicas (UH) previamente definidas, ambas premisas se cumplen. La expresión analítica de la MUSLE, (Williams, 1993), es la siguiente:

$$Y = 11,8 (V Q_p)^{0,56} K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

(ec.2)

Donde:

- Y, es el arrastre producido por una tormenta aislada determinada, en toneladas.
- V, es el volumen de la escorrentía directa, en m^3 .
- Qp, es el caudal instantáneo máximo, en $m^3 s^{-1}$.
- K, es el factor de erosionabilidad del suelo.
- LS, es el factor topográfico (factores de longitud de declive y pendiente).
- C, es el factor de cultivo.
- P, factor de prácticas de conservación de suelos.

Un valor apropiado de densidad media es $1,5 t/m^3$ para los materiales aportados a las lagunas, una vez planimetradas las superficies de cada laguna (generalmente en hectáreas).

El efecto de la emisión anual de sedimentos para cada laguna - dispositivo tipo balsa, en términos de espesor aportado uniformemente al lecho de las mismas, es que el nivel del fondo de dichas lagunas se va elevando por efecto del aterramiento. La estimación realizada considera un reparto uniforme por todo el vaso del humedal o dispositivo artificial, situación que en la realidad no se produce, pero que constituye una buena aproximación a la realidad (CMA-JA, 2002).

Hay que considerar que la densidad de los sedimentos depositados aumenta cada año por efecto de compactación, debido a las nuevas capas aportadas

La evolución de la tasa de colmatación de las lagunas en las que se apliquen medidas regenerativas basadas en la AR constituye una interesante línea de investigación de cara al futuro, si bien queda definido el funcionamiento y aplicación del indicador, de fácil control tras preparar una hoja de cálculo con la parametrización de los datos de campo y teóricos.



Figuras 2 a) y b). Aspecto del canal de recarga artificial al término de un ciclo. Dado el carácter seco del año hidrológico 2005/06, apenas ha habido alteraciones en los taludes del dispositivo por efecto de la erosión, si bien ha habido acumulación de sedimentos producto de la erosión eólica.

R-4) Diferencias de cota del nivel del agua y pendientes

Otro tipo de alteración que afecta a las pendientes de los taludes y a su cota es producida por diferencias en la altura de la lámina de agua dentro de los tramos del dispositivo no revestidos con gaviones.

El indicador está enfocado al estudio de la peligrosidad o impacto por efecto de las operaciones de AR en las estructuras de obra, caminos adyacentes y, por ende, terrenos cultivados.

Se calcula sustrayendo a la cota del terreno la cota media del agua subterránea en un determinado sector, determinada en los piezómetros de observación, y estudiando el paralelismo con la superficie topográfica. De este modo se han determinado las zonas más vulnerables ante posibles inundaciones.

La detección de domos en la capa freática por efecto de la heterogeneidad del acuífero resulta otro factor clave en las inundaciones, a pesar de tratarse de zonas escasamente deprimidas con respecto al entorno.

Las zonas vulnerables pueden ser calculadas en gabinete mediante operaciones de álgebra de mapas, quedando limitado el uso del indicador a estudiar en campo las variaciones de la capa freática y su cercanía a la profundidad de alerta establecida en 2 metros (Christen et al, 2001) y 1,5 m en acuíferos eólicos (Fdez. Escalante, 2005). En el caso concreto de la Cubeta de Santiuste, la cartografía resultante de aplicar este indicador se presenta en la figura 3 (cartografía de isovariaciones de la capa freática en un ciclo de recarga artificial). En este mapa han sido delimitadas las zonas en las que el nivel freático sobrepasa la cota – 1,5 respecto al nivel medio del terreno (profundidad de alerta) (Christen et al, 2001) durante el ciclo de recarga artificial 2002/03. Para ello se han ubicado los principales dispositivos en los depocentros del acuífero o zonas con mayor espesor de arenas y, por tanto, mayor capacidad de almacén. Las zonas más susceptibles de inundación se han posicionado confrontando el nivel de los pozos de medida (metros por debajo de la superficie topográfica media) situados a una distancia prudencial del dispositivo de recarga artificial (en general más de 10 metros) y los caudales circulantes por el caz en la estación de aforos más cercana, además de la inspección visual en campo.

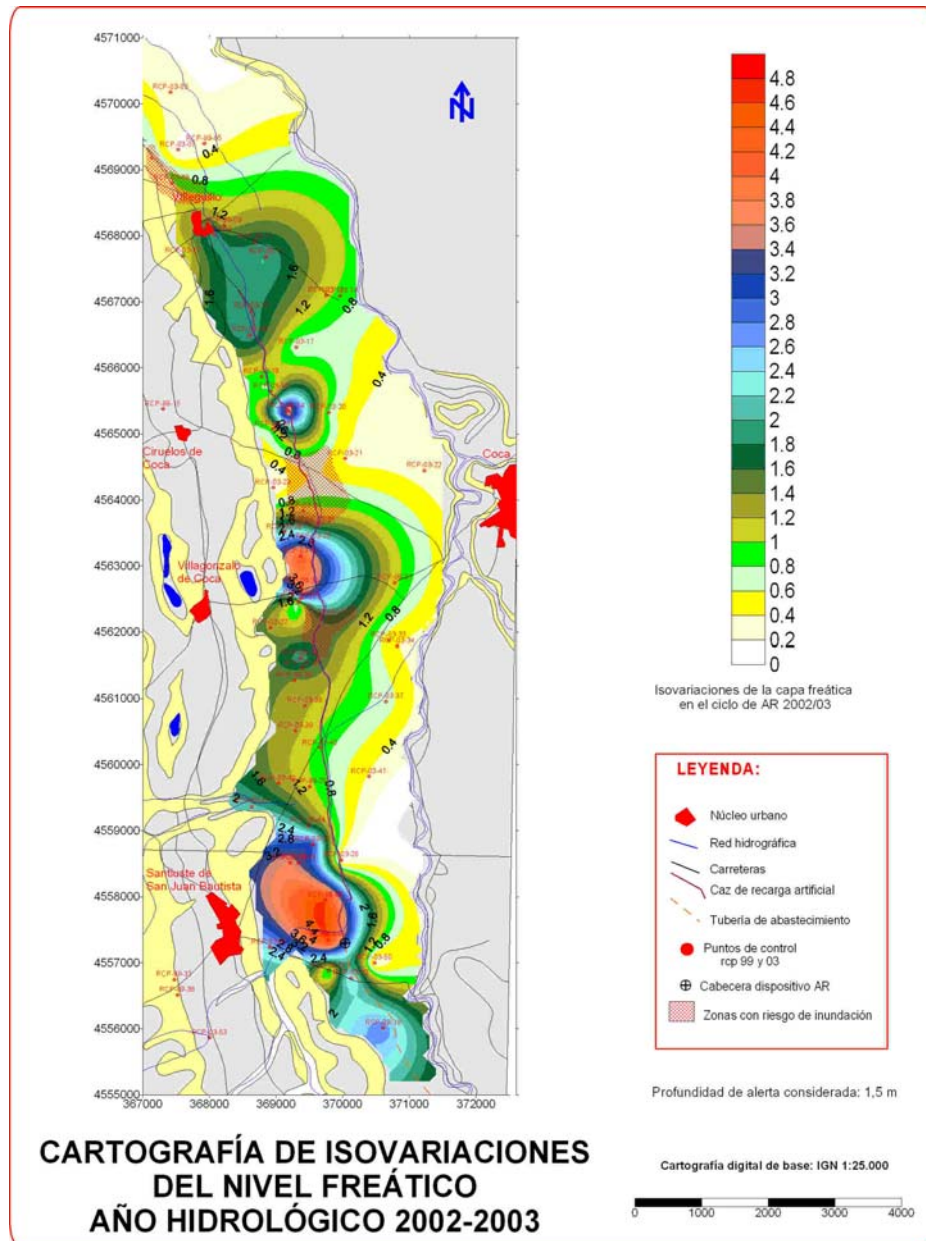


Figura 3. Cartografía de isovariaciones de la capa freática en un ciclo de recarga artificial. Delimitación de las zonas en las que el nivel freático sobrepasa la profundidad de alerta de 1,5 m durante el ciclo de recarga artificial 2002/03.

R-5) Alteraciones en los parámetros hidrogeológicos

Existe una relación directa entre la variación de las propiedades hidrogeológicas del acuífero y la tasa de AR. Los parámetros más afectados son la permeabilidad (K), el coeficiente de almacenamiento (S) y la transmisividad (T), tanto por la colmatación de los poros del acuífero con los sólidos disueltos en las aguas de AR como por las continuas variaciones del espesor saturado.

El sistema rangos-pesos será dependiente de la variación de magnitud del parámetro, de modo que el indicador estará condicionado de forma directa por la colmatación.

R-6) Colmatación del dispositivo y descenso de la permeabilidad del lecho y paredes

Este indicador valora el impacto de mayor intensidad que actúa en las instalaciones de AR; la colmatación.

La evaluación del impacto requiere del empleo de procedimientos indirectos, ya que no es fácilmente cuantificable. Con este objetivo se han llevado a cabo dos tipos de actuaciones diferentes, basadas en ensayos de infiltración y en el estudio con lupa binocular en el *cake* muestreado en el fondo del dispositivo a distintas profundidades al final del primer ciclo y del tercero de AR.

El resultado es que la tasa de infiltración disminuye a medida que aumenta la colmatación en las paredes y en el lecho del canal. El cálculo de cómo influye la colmatación en la tasa de infiltración es complejo, dado que concurren muchos parámetros interrelacionados, como la entrada de aire al sistema, ciclos de heladas, etc. De este modo se ha adoptado un indicador determinístico, basado en el estudio comparativo con lupa binocular y microscopio de los sedimentos del fondo del dispositivo antes y después de cada ciclo de AR, con objeto de conocer las variaciones cualitativas y el porcentaje de finos de las partículas agregadas al dispositivo principal.

Inicialmente se realizó un muestreo y estudio mediante lupa binocular de muestras tomadas al término del primer ciclo de AR en dos sectores de la zona de estudio: inmediaciones del "Cuerno de la Revilla" (cabecera del dispositivo) y en la zona del Sanchón (sector central). Se han tomado dos muestras en cada localización: en superficie (*cake*), y en torno a 15 cm de profundidad. La fecha del primer muestreo fue el 14 de junio de 2003 y el segundo el 25 de junio de 2006. En las siguientes figuras se ilustra el aspecto de las muestras superficiales

tomadas en situación inalterada (antes del primer ciclo) y en junio de 2003, en superficie y a 15 cm de profundidad (Figs. 5 a 7).



Figura 4. Variaciones en la permeabilidad vertical por efecto de la acumulación de finos e inicio de procesos colmatantes. Fondo de la balsa del Sanchón (sector central de la Cubeta). 19 de mayo de 2006.

Estudiando este “cake” con lupa binocular a nivel superficial, se aprecia un incremento importante en finos, geles y, en general, partículas disueltas de origen orgánico, que una vez desecadas presentan un aspecto deshidratado y escaso volumen, que aumenta considerablemente al humedecer las muestras. Se aprecian además semillas y granos de polen (*vid. Figuras 5 a 7*), que se consideran indicios de la alta actividad orgánica de los sedimentos del fondo de canal, con indicios de colmatación por procesos de *bioclogging*.

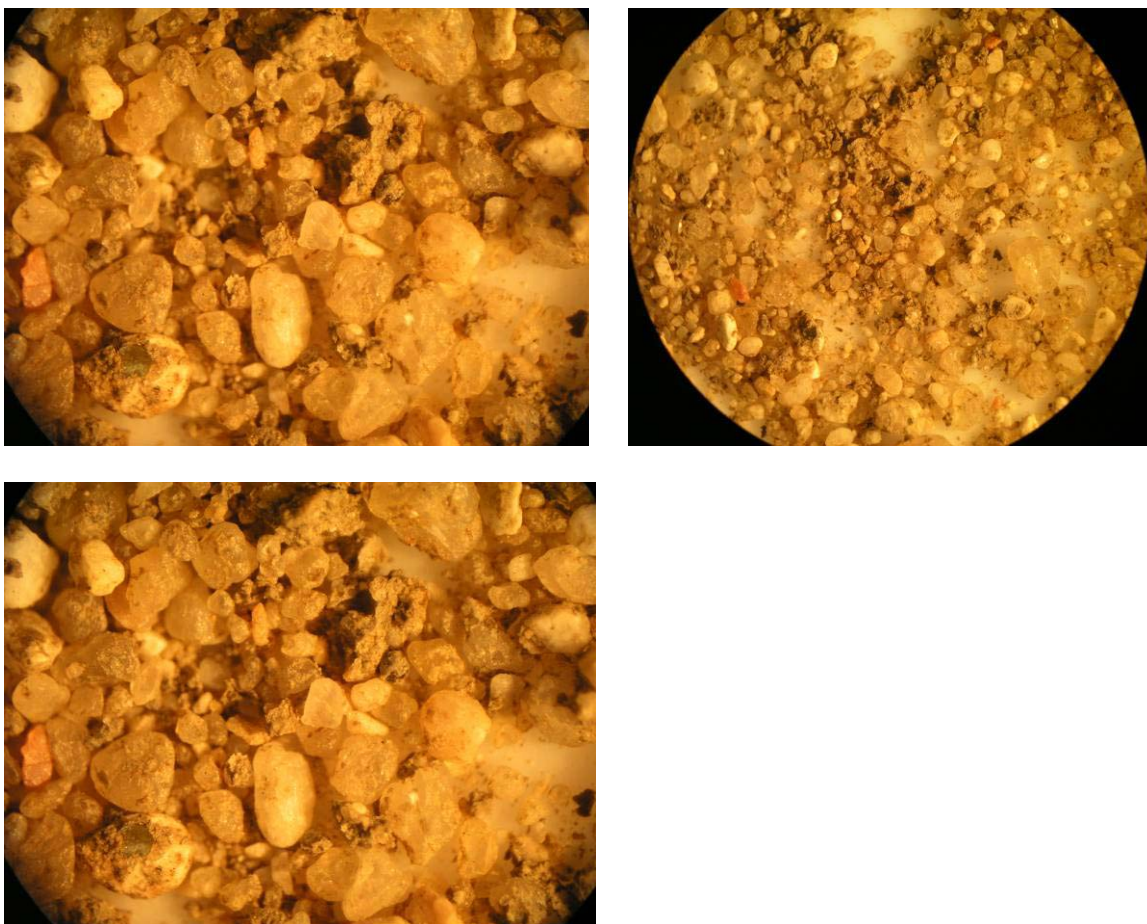
La textura arenosa inicial se ve fuertemente alterada, abundando las partículas finas adheridas a la superficie de los granos de arena por adhesividad, propiedad inherente a la elevada tensión superficial de las arcillas.



Figs. 5 a) y b). Aspecto del medio receptor previamente a las operaciones de AR. Muestreo superficial. Fotografías a distintas escalas.



Figs. 6 a) y b). Aspecto del medio receptor tras el primer año de actividad. Muestreo realizado en el cake superficial hasta 2-3 cm. Fotografías a distintas escalas.



Figs. 7. a) y b). Aspecto del medio receptor tras el primer año de actividad. Muestreo realizado a 15 cm de profundidad.

La presencia de partículas ennegrecidas por óxido induce a pensar en la influencia de la concentración de oxígeno disuelto en el sistema, apreciándose además filamentos metálicos oxidados. En los perfiles hidroquímicos se ha detectado que la disolución de hierro en condiciones reductoras viene seguida por procesos oxidantes y precipitación de hierro, proceso catalizado por bacterias (Stuyfzand, 1993, Fdez. Escalante, 2005).

El *cake* superficial presenta un índice de sobresaturación en calcita en la matriz y cemento, según se desprende de su reacción con el ácido clorhídrico en sectores donde no ocurría tal reacción previamente a las operaciones de AR.

Dada la necesidad de implantar un sistema de control de la colmatación y dado que existe un grado de conocimiento del acuífero en fase preoperacional suficiente, resulta preciso elaborar o adoptar un índice de colmatación específico.

Diseño de un indicador medioambiental de colmatación específico

Como punto de partida, se ha realizado un estudio de los índices de colmatación ya diseñados disponibles en la literatura hidrogeológica, como son los indicadores: MFI [índice de fallo en membrana, “Modified Fouling Index” (Schippers & Verdouw, 1985)], AOC [Carbono Orgánico Asimilable (Hijnen & van der Kooij, 1992)], BFR [Velocidad de Generación de Biofilm o “Biofilm formation rate” (van der Kooij, 1995)], BFT [Test de Paso del Filtro o “Bypass filter test” (D. Pyne, 1998 y 2002 y Pérez-Paricio, 2000), etc.

Como ejemplo, una valoración inicial del índice MFI en la Cubeta para el primer ciclo de AR es de 25 a 30 s/l² (unidades MFI).

Las condiciones específicas en que se desarrolla la actividad ha generado la necesidad de elaborar un indicador específico, dado que ninguno de los cuales se ajusta a las propiedades del medio, disponibilidad de datos y carestía de cálculo.

El indicador propuesto es específico para la zona de estudio y escenarios análogos, y tiene en cuenta el potencial de colmatación físico, biológico e indirectamente químico para sistemas de AR superficiales.

Los parámetros más importantes que deben ser determinados son:

- TOC en el agua de AR.
- % de arcilla en el medio receptor.
- Superficie de infiltración.
- Tiempo de recarga.
- Volumen recargado.

Todos estos pueden ser agrupados en un sencillo indicador, que corresponde a variaciones en el porcentaje de finos en el suelo y su evolución a lo largo del año/ciclo de recarga. Este indicador refleja la cantidad de partículas finas que desde el agua de AR pasan al acuífero. El porcentaje es dependiente de los parámetros de gestión, por tanto, debe tenerse en cuenta la superficie de infiltración, el tiempo y el volumen. Lógicamente

con mayor tiempo y volumen de actuación el indicador será mayor.

El indicador puede ser evaluado mediante una simple granulometría, empleando para ello un filtro de finos tipo 200 ASTM. Las muestras deben ser tomadas en superficie y a 15 cm de profundidad. La densidad de muestreo adoptada ha sido en total 6 estaciones equidistantes 2 km. El muestreo debe realizarse, al menos, una vez al mes durante el periodo de operatividad del dispositivo, y una vez más en la época estival antes del inicio de las labores de limpieza y mantenimiento.

El porcentaje de finos (en peso) con respecto al valor inicial indica las diferencias cuantitativas. La diferencia de pesada es sometida a un factor corrector. En principio, se propone que sea dividido por el número de días de AR desde el inicio del ciclo hasta la fecha de muestreo, y multiplicado por 100 para que el rango alcance un valor más cercano al de los restantes indicadores, quedando por encima de éstos al tratarse de un indicador de los más importantes. El hecho de disponer de tantas mediciones a lo largo del ciclo conlleva la necesidad de emplear el valor medio de todos ellos como indicador global al término del ciclo de AR.

R-7) Concentración de oxígeno disuelto en los piezómetros de observación

El estudio de ambientes hidroquímicos requiere precisar la concentración de oxígeno disuelto en las aguas subterráneas y su evolución en el tiempo, conociendo así las fases donde se produce la máxima desaireación de las aguas de AR, la generación de ambientes oxidantes o la gravedad del efecto Lisse (Krul & Liefcrinck, 1946) en caso de manifestarse.

Se han probado dos isorrelaciones iónicas para las condiciones del acuífero superficial, que son las relaciones Fe/O_2 y NO_3/O_2 . Estas relaciones confrontan la persistencia del oxígeno disuelto en las aguas subterráneas con la presencia de hierro y nitratos en el acuífero, sustancias presentes y abundantes en las condiciones del estado preoperacional.

Ambas posibilitan deducir y posicionar ambientes hidroquímicos en el acuífero y averiguar que zonas presentan predominio de reacciones oxidantes, reductoras, etc., que requieren aplicar técnicas SAT para minimizar la contaminación, evitar la génesis de precipitados, disminuir el grado de colmatación, etc. Los resultados obtenidos en la zona de estudio pueden ser considerados satisfactorios.

R-8) Evolución de la calidad del agua subterránea por el uso de fertilizantes nitrogenados en el regadío

Al igual que el anterior, permite determinar las variaciones en la hidroquímica de las aguas subterráneas. El indicador funciona al cuantificar las diferencias entre fechas consecutivas del indicador de estado de variaciones del contenido en nitratos de las aguas subterráneas (acuíferos contaminados por nitratos).

R-9) Concentración en iones carbonato/bicarbonato en las aguas de AR

Al igual que los dos anteriores, el control de la concentración en carbonatos en las aguas de recarga y en el acuífero permite conocer la presencia de ambientes reductores en el sistema y zonas con precipitación de carbonatos, más importantes si hay diferencias de temperaturas importantes entre las aguas de AR y las nativas. Ambos impactos pueden ser corregidos mediante técnicas SAT específicas (técnicas de tratamiento de suelo y acuífero o *Soil and Aquifer Treatment*) (Pyne, 2002), si bien es preciso controlar su evolución.

La variación de la alcalinidad en el acuífero entre fechas sucesivas debe contar con la determinación previa en las aguas de AR y en el acuífero, siendo el indicador la variación cualitativa media de las sucesivas mediciones realizadas durante un ciclo de AR en los piezómetros seleccionados, que deben hallarse en las inmediaciones de la cabecera del dispositivo. La determinación debe tener una cadencia al menos mensual durante el ciclo de AR.

R-10) Afección a cultivos dentro del área de influencia

La pérdida de cosechas por inundaciones simultáneamente a las operaciones de recarga artificial pueden ser consideradas como un indicador económico de respuesta (Beaufoy, 2000a y b). El indicador queda en función de la cuantía de las pérdidas por efecto de las inundaciones.



Figura 8. Los cultivos alcanzan el borde del canal de recarga artificial. El espacio entre el canal y la vía de servicio es colonizado por vegetación.

R-11) Afección en la vegetación nativa dentro del área de influencia

Los humedales sometidos a un grado de afección importante responderán ante el impacto ocasionado sustituyendo la vegetación endémica típica por otras especies alóctonas, o bien autóctonas menos impropias (Sandlund, & Viken, 1997).

La afección a la vegetación nativa puede ser estudiada como un indicador de presencia/ausencia.

La presencia de especies exóticas, nitrófilas, etc., indican un grado de afección relevante, mientras que la ausencia de las siguientes especies, típicas de la zona, puede constituir la otra faceta del indicador:

- *Aerulopus littoralis*.
- *Artemisia caerulescens*.
- *Convolvulus lineatus*.
- *Frankenia lavéís*.
- *Juncus maritimus*.
- *Juncus subulanus*.
- *Limonium costae*.
- *Suaeda vera*.

Este listado no es exhaustivo, y es preciso ampliar el conocimiento de las condiciones ecológicas de los humedales en cada escenario para su correcto diseño.

R-12) Variaciones en las condiciones ecológicas en los humedales

El estudio de las condiciones ecológicas en los humedales puede ser considerado un indicador de respuesta ante la posible regeneración hídrica de humedales mediante las operaciones de recarga artificial. Este indicador ecológico servirá para comprobar la idoneidad de la AR sobre los humedales que se pretende recuperar a partir de determinaciones de presencia/ausencia de determinadas especies de flora y fauna en los humedales en determinadas estaciones del año.

Algunas de las especies indicadoras de flora del cuenco y primera franja perilagunar, seleccionadas por su endemismo, por ser autóctonas y no tener carácter nitrófilo, son las siguientes (inventario propio con asesoramiento de botánicas especialistas):

- *Alopecurus geniculatus*.
- *Deschampsia cespitosa* subsp. *refracta*.
- *Rumex conglomerata* (ampliamente extendido por la zona).
- *Festuca arundinacea* subsp. *fenas*.
- *Juncus acutus*.
- *Juncus gerarsi*.
- *Scirpus maritimus* subsp. *compactus*.

En cuanto a especies de fauna, las más destacables es la presencia de anátidas tipo cerceta común (*Anas crecca*) y ánade rabudo (*Anas acuta*), al ser consideradas indicadores de aguas limpias, por ser una especie muy sensible a los cambios de calidad de las aguas.

El indicador requiere el seguimiento plurianual del sistema y la elaboración de sucesivos inventarios antes de contar con un diseño depurado.



Figura 9. A lo largo del invierno de 2006 se han comenzado las labores de regeneración hídrica en la laguna de la Iglesia (Villagonzalo de Coca) con aguas derivadas del dispositivo de recarga artificial de acuíferos de la Cubeta de Santiuste, albergando avifauna ausente desde hacía varios años. Foto tomada el 19 de mayo de 2006.

R-13) Variaciones en el nivel del agua del cuenco en los humedales o del nivel freático en criptohumedales

El indicador está referido para cuantificar las variaciones del nivel del agua en los bodones o lavajos con respecto a la cota definida en la definición morfométrica inicial, es decir, las características del entorno preoperacional. En todo caso tiene que estar referido a una fecha determinada.

La medición requiere la instalación de regletas graduadas fijas y su seguimiento, como medida a integrar dentro del programa de vigilancia y control, si bien, hasta la fecha, no se ha llevado a cabo en los humedales en proceso de restauración.

R-14) Reducción del consumo indebido de agua

Se trata de un indicador que evalúa la eficiencia del riego y la variación de la efectividad de las conducciones entre fechas sucesivas. Se mide por el porcentaje de pérdidas en las conducciones/sistema de distribución. En caso de no poder determinar la diferencia volumétrica entre la entrada y salida mediante caudalímetros, deberá cuantificarse en una posición seleccionada de manera aleatoria periódicamente.

R-15) Balance de nutrientes en el regadío

Se trata de un indicador de respuesta que permitirá conocer si las dosis de abonado son correctas o se está llevando a cabo un sobreabonado en los cultivos, con la consecuente degradación del sistema, introducción de especies nitrófilas, generación de condiciones hidroquímicas anómalas, etc.

El indicador funciona al cuantificar las diferencias entre fechas consecutivas, determinando la presencia de sobrecargas. Debe ser cuantificado en los piezómetros de observación con una cadencia mensual durante todo el año.

4. Discusión

Algunos de los indicadores de respuesta inicialmente diseñados pueden ser evaluados, mientras que otros precisan más ciclos de AR o inversiones adicionales para su correcta determinación, como son aquellos dependientes del período de residencia de agua en el acuífero o aquellos que precisan infraestructuras de obra. En todos casos, son indicadores operativos tras actuar el hombre en el medio.

El cálculo y aplicación del diseño inicial se ha aplicado al humedal “Laguna de la Iglesia” de Villagonzalo de Coca, que es el único de esta zona que ha experimentado labores de restauración medioambiental y regeneración hídrica mediante la técnica de recarga artificial de acuíferos. Según información verbal de la comunidad de regantes, en breve está previsto aplicar nuevas medidas correctoras a la “Laguna de las Eras”, en la misma pedanía.

La mayoría de los indicadores diseñados pueden ser evaluados en la actualidad, mientras que otros requieren futuras tomas de datos para su aplicación.

Al igual que los indicadores de estado y presión, los de respuesta pueden contar con un sistema de rangos pesos, de modo que aquellos indicadores más importantes para un fin determinado sean amplificadas y viceversa. Este procedimiento permite además dimensionar adecuadamente la evaluación de impacto ambiental de los impactos acumulativos y sinergismos en algunos de los indicadores propuestos.

La actuación del hombre sobre el ecosistema es patente, si bien, el modo en que se está llevando la actuación conlleva nuevos impactos medioambientales que deben ser corregidos. Por ejemplo, la conductividad de la Laguna de la Iglesia en 1999 sobrepasaba ligeramente los 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (medición directa del primer autor), mientras que las aguas de recarga artificial, tras interactuar con los suelos, oscilaban en torno a 2.000 en marzo de 2006. Esta tipología de problemas, y otros asociados a variaciones de la calidad de las aguas, deben contar con nuevas actuaciones para reproducir unos humedales lo más parecidos posible a su estado originario en cuanto a condiciones geoambientales se refiere, lo que determina su estado ecológico.

Una de las metodologías más idóneas para salvaguardar la calidad hidroquímica originaria de las aguas superficiales es la recarga artificial inducida. El proceso parece ser viable a base de forzar la dirección de las líneas de flujo mediante el bombeo de pozos situados en puntos específicos que provoquen un “efecto de llamada”, de modo que las aguas subterráneas interactúen con aquellos lugares del sustrato más cargados de sal, o bien ubicando instalaciones una vez conocida la orientación de las equipotenciales en el “campo de bombeo” en diferentes etapas y épocas del año.

El estudio de la tendencia evolutiva debe conseguir una composición parecida a la del agua que originariamente ocupaba estos humedales (en general salina y de flujos regionales) mediante técnicas de estimulación y pretratamiento de flujos locales.

Los indicadores propuestos emanan de una serie de fases técnicas, que se apoyan en gran medida en la caracterización hidrogeológica del acuífero previa a la recarga artificial. Las fases tienen carácter secuencial, están desarrolladas en Fdez. Escalante, (2002a), y son:

- Actualización del catálogo de bodones presentes en la zona de estudio cuyo funcionamiento depende de su conexión con acuíferos.
- Planteamiento de una ficha que recoja una descripción precisa del entorno preoperacional de los humedales hidrodépendientes.
- Listado y posicionamiento de las obras y actuaciones antrópicas y estudio de su posible interacción sobre los humedales mediante sistemas de información geográfica.
- Planificación de un programa de seguimiento y control de la evolución de los mismos mediante una serie de indicadores medioambientales.

Una posibilidad adicional en caso de considerarse positivo y viable recuperar estos humedales sería el empleo de aguas subterráneas, no exclusivamente excedentes hídricos.

También se puede prever el riesgo que representa la recarga sobre los humedales preexistentes convertidos en terrenos cultivables.

Otros elementos clave a tener en cuenta son:

- Posible afección a las masas forestales (pinares), como consecuencia de la alternancia intranual de depresión (bombeo) y elevación (recarga natural y artificial) del nivel freático.
- Posible incidencia de la depresión de la capa freática en la textura y estructura de la formación detrítica cuaternaria (procesos de compactación y subsidencia) y posibles daños generados al interactuar con el sistema social, como procesos de hinchamientos, hundimientos, etc., que afecten a construcciones, vías de comunicación, etc.

5. Conclusiones

Toda operación de recarga artificial se encuentra supeditada a la disponibilidad de agua para su derivación. Por tanto, cualquier sistema indicativo debe partir de este primer condicionante, adquiriendo la nulidad en aquellos años en los que la derivación de agua desde el cauce del río Voltoya sea inviable, por efecto de la sequía, por salvaguardar el

caudal ecológico u otras causas. En este caso, debería contarse con un sistema de indicadores opcional o alternativo que permita seguir la evolución del sistema en periodos de sequía.

Los indicadores desarrollados tienen en cuenta la disponibilidad hídrica, apoyada en datos meteorológicos e hidrológicos, así como en las variaciones en el almacenamiento del agua subterránea. Estos se basan en las consignas básicas para los sistemas de indicadores, es decir, deben permitir un cálculo fácil, que se resuman con un simple número y que sirvan de herramienta para la toma de decisiones de forma rápida y sencilla (Llamas, 2001). El procedimiento descrito, en su totalidad, resulta complicado y tedioso, si bien se trata de un listado amplio que lo más normal es que sea reducido en cada ámbito de aplicación a unos pocos indicadores, dejando todos los demás en blanco.

Las condiciones geoambientales actuales, la sequía, el problema del cambio climático, etc., son cuestiones que subyacen en la toma de decisiones por parte de las administraciones involucradas en la gestión hídrica, por tanto, es preciso contar con sistemas para evaluar y cuantificar valores, en algunas ocasiones intangibles, y en otras con un elevado valor contingente. En este sentido la recarga artificial de acuíferos se perfila como una técnica idónea para la producción de biomasa y presentar cierta resistencia al cambio climático, la desertización, etc.

Desde el punto de vista de la planificación, parece necesario considerar escenarios que tengan en cuenta la existencia de periodos de sequía, con objeto de prever la utilización conjunta o alternada de aguas superficiales y subterráneas, con todas sus implicaciones técnicas, legales, institucionales, económicas, ecológicas y de calidad.

Es previsible que los ciclos de sequías e inundaciones malogren los sistemas de distribución y de recarga artificial (problemas originados por desuso, aterramiento, etc.), lo que requiere nuevas intervenciones del hombre y la permanente actualización de indicadores de respuesta. El sistema aquí presentado, por tanto, debe ser considerado un punto de partida que cada técnico deberá adaptar a su ámbito de actuación, modificando y simplificando cuantos indicadores sean precisos. Previsiblemente gran parte de las innovaciones tecnológicas futuras contribuirán eficazmente a la gestión hídrica, tanto para aguas superficiales como subterráneas

La disponibilidad de fichas consecutivas de la evaluación de impacto ambiental empleando un sistema de indicadores, bien sean de presión, estado, respuesta o todos,

constituye un indicador medioambiental de respuesta en sí. Comparando fichas cumplimentadas en etapas distantes se puede ver cómo ha sido su evolución.

6. Agradecimientos

El artículo y el trabajo de investigación que subyace ha sido posible gracias a Fermín Villarroja Gil, las biólogas Rosa Cordero e Inmaculada Prieto, el biólogo Óscar García, así como a los técnicos de la división de I+D+i del Grupo Tragsa, Manuel López y Rodrigo Calero.

7. Bibliografía

- BEAUFOY, G. (2000a). *“Environmental Impact of Olive Oil Production in the European Union”*. European Forum on Nature Conservation and Pastoralism and the Asociación para el Análisis the Reforma de la Política Agro-rural. Final Report. March 2000.
- BEAUFOY, G. (2000b). *“The Environmental Impact Of Olive Oil. Production In European Union”*. Practical Options For Improving The Environmental Impact. Commision Of The Environmental Directorate General.
- BOE. (1989). Ley 4/1989, de 27 de marzo, de conservación de los espacios naturales y de la flora y fauna silvestres. (BOE. n.º 74, de 28 de marzo de 1989).
- BOE. (1998). Real Decreto 1664/1998, de 24 de julio, por el que se aprueban los Planes Hidrológicos de cuenca.
- BOE. (2002). Real Decreto 329/2002, de 5 de abril, por el que se aprueba el Plan Nacional de Regadíos (BOE. n.º 101, de 27 de abril de 2002).
- BOE. (2003). Real Decreto 606/2003, de 23 de mayo, por el que se modifica el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público.
- CMA-JA. (2002). *“Restauración de las reservas naturales de Laguna Honda y Laguna del Chinche. T.M. de Alcaudete (Jaén)”*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía-Tragsatec. Informe técnico no publicado.
- CHRISTEN, E.W, PRASAD, A & KHAN, S. (2001). *“Spatial Analysis of shallow groundwater pumping for salinity control and potential conjunctive use: A case study of the Coleambally Irrigation Area”*. CSIRO Land and Water PMB nº 3. Griffith NSW 2680. Technical Report 40/00, July 2001. 27 pp. Australia.
- EOI (2000). *“Prontuario de gestión medioambiental”*. Escuela de Organización medioambiental- SEPI. Madrid, 2000.

- FERNÁNDEZ ESCALANTE, A.E., (2002). *“La recarga artificial en la Cubeta de Santiuste (Segovia) Estudio de las condiciones de referencia, funcionamiento hidrogeológico y aspectos medioambientales relacionados.”* Trabajo de aspiración a la Diplomatura de Estudios Avanzados. Dpto de Geodinámica. Facultad de CC. Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. Trabajo no publicado.
- FERNÁNDEZ ESCALANTE, A.E. (2005). *“Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales. Aspectos cualitativos y medioambientales. La experiencia en la Cubeta de Santiuste, Segovia”*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Tomos I, II y III.
- FERNÁNDEZ ESCALANTE, A.E., & 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, R. (2002). *“Los espacios naturales protegidos frente a la Directiva Marco del agua. comentarios y proposiciones acerca de los estudios de impacto ambiental en los mismos”*. Jornadas técnicas sobre la gestión y el control del agua frente a la Directiva Marco. UAM.-CYII.
- FERNÁNDEZ ESCALANTE, A.E. y GARCÍA, M. (2004a). *“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, M. (2004b). *“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. AEH-IGME. Octubre de 2004.
- FERNÁNDEZ ESCALANTE, A.E., GARCÍA, M., VILLARROYA, F. y MONTERO, J. (2005a). *“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)”*. Revista Tecnología y Desarrollo. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Volumen III. Año 2005. Universidad Alfonso X el Sabio.
- FERNÁNDEZ ESCALANTE, A.E., GARCÍA, M. Y VILLARROYA, F. (2005b). *“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. (2005c). "Propuesta de una clasificación de humedales para ser restaurados mediante operaciones de recarga artificial de acuíferos: Aplicación al complejo de humedales de Coca-Olmedo (Segovia)". Revista Tecnología y Desarrollo. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Volumen III. Año 2005. Universidad Alfonso X el Sabio.
- FRIENDS, A. & RAPORT, D. (1979). "*Towards a comprehensive framework for environment statistics: stress-response approach*". Ottawa, Canadá: Statistics Canada.
- GONZÁLEZ BERNÁLDEZ, F. (1989). "*Ecosistemas áridos y endorreicos españoles*". En: zonas áridas en España: 223-238. Real Academia de Ciencias de Madrid.
- HIJNEN, W. & 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.
- KRUL, WF, LIEFRINCK, FA (1946). "*Recent groundwater investigations in the Netherlands*". Monograph on the progress of research in Holland. Elsevier, New York, 78 pp.
- 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.
- MIMAM (2000). "*Indicadores Ambientales. Una propuesta para España*". Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. Ministerio de Medio Ambiente. 2000.
- LLAMAS, M.R. (2001). "*Aguas subterráneas: retos y oportunidades*". Fundación Marcelino Botín. Ediciones Mundi-prensa.
- PÉREZ-PARICIO, A. (2000). "*Integrated modelling of clogging of artificial recharge systems*". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- PYNE, DG. (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, Ámsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.
- PYNE, DG. (2002). "*Water quality changes during aquifer storage recovery (ASR)*". 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.

- REY BENAYAS, J. M. (1991). *"Aguas Subterráneas y Ecología. Ecosistemas de descarga de Acuíferos en Los Arenales"*. ICONA.-CSIC. Colección Técnica ICONA.- MAPA.
- SANDLUND, O.T., & VIKEN, Å. (Eds.) (1997). *"Report from Workshop on Freshwater Biodiversity"*. Selbu, Norway, 5.-7. June 1997. The Trondheim Conferences on Biodiversity.
- SCHIPPERS, J.C., J. VERDOUW, & G.J. ZWEERE. (1995). *"Predicting the clogging rate of artificial recharge wells"*. Journal of Water Supply Research and Technology -Aqua (Oxford), 44(1): 18-28.
- 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.
- VAN DER KOOIJ, D., VROUWENVELDER, H.S. & VEENENDAAL, H.R. (1995). *"Kinetic aspects of biofilm formation on surfaces exposed to drinking water"*. Water Sci. Tech, 32(8): 61-65.
- WILLIAMS, D.D. (1993). *"Nutrient and flow vector dynamics at the hyporheic/ groundwater interface and their effects on the interstitial fauna"*. Hydrobiologia 251:185-198.
- WILLIAMS, J.R., BERNDT, H.D. (1977). *"Sediment yield prediction based on watershed hidrology"*. 1.100-1.104. Transaction of the A.S.A.E. Michigan.