

La gestión integral del agua de lluvia en entornos humanizados

C U A D E R N O T E C N O L Ó G I C O



La gestión integral del agua de lluvia en entornos humanizados

Autor:

Empresa de Transformación Agraria, S.A., S.M.E., M.P. (Tragsa)

Edita:

Empresa de Transformación Agraria, S.A., S.M.E., M.P. (Tragsa)

Equipo

COORDINADORES

Ignacio Prieto Leache (Arquitecto)
Luis Antonio Galán Benzal (Ingeniero Industrial)

COLABORADORES

Grupo Tragsa

Enrique Fernández Escalante (Dr. Ciencias Geológicas)
Gustavo de las Heras Izquierdo (Arquitecto)
Amparo de Teresa Santiesteban (Arquitecto)
Diana Andaluz (Arquitecto)
José Cerrato (Ingeniero Industrial)
Francisco Ábalos (Arquitecto Técnico)
Miriam Prada (Arquitecto Técnico)
Manuel Ruiz Machuca (Arquitecto Técnico)
Marina Marzal (Arquitecto)
Helena Fernández Revilla (Arquitecto)

Daniel Otero Cabeza de la Vaca (Ingeniero de Montes)
Marisol Codés Ortega (Ingeniero Agrónomo)
Luis Fernández Royuela (Ingeniero Agrónomo)
Hortensia Crespo Muñoz (Ingeniero Agrónomo)
Carlos Copano González de Heredia (Ingeniero de Montes)
Fco. Javier Castaños Jover (Ingeniero de Montes)
Alberto Encinas Escobar (Ingeniero Agrónomo)
Óscar Blanco Nieto (Ingeniero Agrónomo)
Rodrigo Calero Gil (Ingeniero Agrónomo)
Manuel López Hernández (Dr. Ingeniero Agrónomo)

Universidad Politécnica de Madrid

Grupo de Arquitectura Bioclimática
en un entorno sostenible (ABIO)
de la Escuela Técnica Superior
de Arquitectura

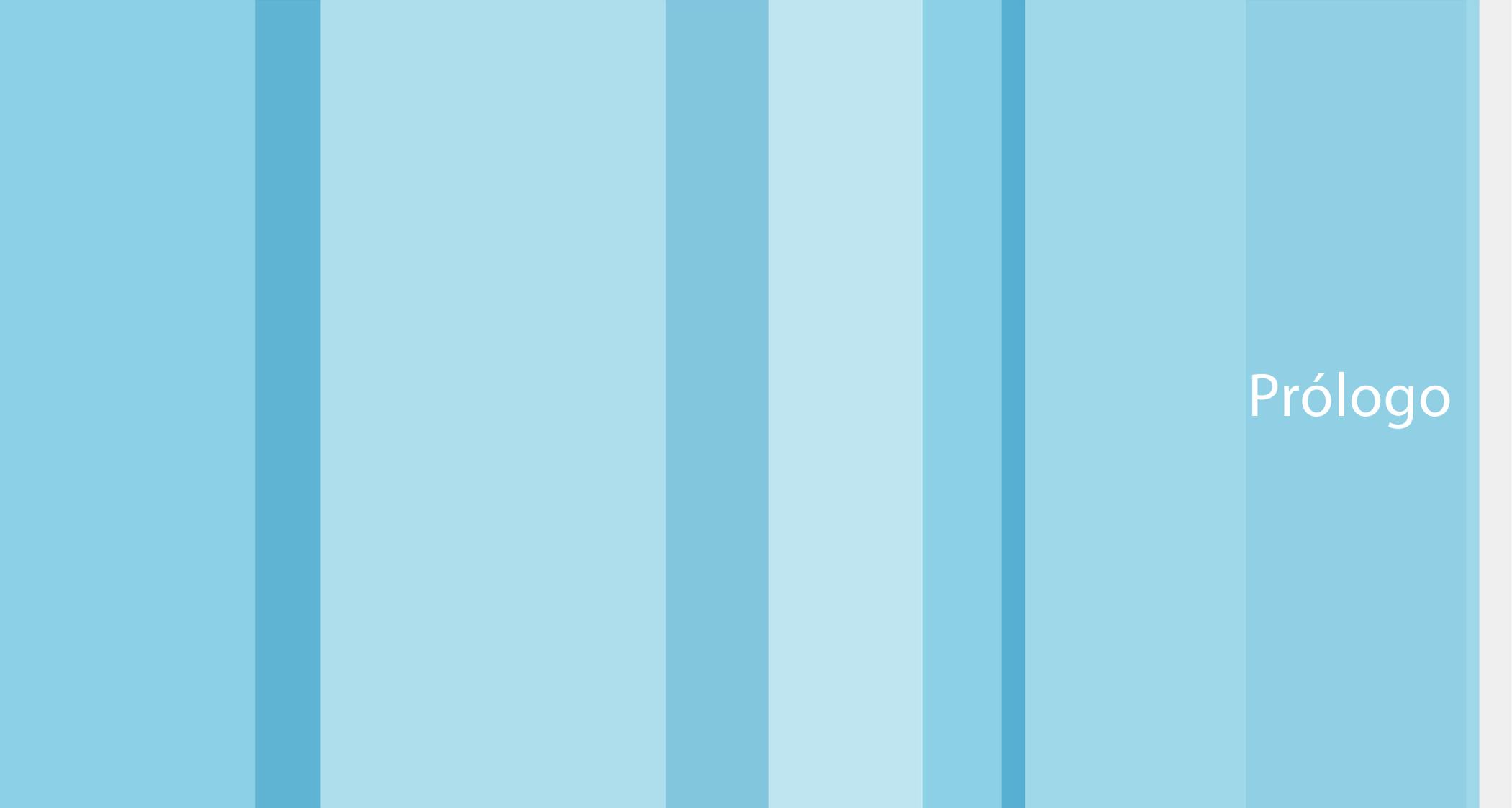
Alberto Gómez González (Arquitecto)
Javier Neila (Arquitecto)
César Bedoya (Arquitecto)
Inma Morgado (Arquitecto)
Hansel Michel (Arquitecto)
Elisa Costas (Arquitecto)

La gestión integral del agua de lluvia en entornos humanizados



Índice

| | | | | | |
|--------------------------------------------------|----|----------------------------------------|-----|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Prólogo..... | 7 | 5. Cubiertas y fachadas vegetales..... | 76 | 8.4. Estrategias en función de la precipitación, la permeabilidad y el diseño..... | 140 |
| 1. Aspectos generales | 8 | 5.1. Justificación | 77 | 8.5. Ejemplo representativo..... | 142 |
| 1.1. Objetivo y justificación | 9 | 5.2. Condicionantes de diseño | 80 | 9. Caminos..... | 146 |
| 1.2. Escenario de aplicación..... | 12 | 5.3. Elementos configuradores..... | 81 | 9.1. Justificación | 147 |
| 1.3. El modelo de gestión..... | 14 | 5.4. Tipología | 86 | 9.2. Tipología | 148 |
| 1.4. Objetivos básicos | 18 | 5.5. Recomendaciones de diseño..... | 96 | 9.3. Recomendaciones de diseño..... | 149 |
| 1.5. Recomendaciones de diseño..... | 19 | 5.6. Ejemplo representativo | 99 | 9.4. Ejemplo representativo..... | 151 |
| 1.6. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible..... | 22 | 5.7. Ficha comparativa | 100 | 9.5. Ficha comparativa | 153 |
| 1.7. Ejemplo representativo | 24 | 5.8. Resumen..... | 101 | 10. Instalaciones | 154 |
| 2. Almacenamiento de agua..... | 26 | 6. Aparcamientos..... | 102 | 10.1. Justificación | 155 |
| 2.1. Problemática | 27 | 6.1. Justificación | 103 | Almacenamiento de material | 156 |
| 2.2. Tipología | 28 | 6.2. Tipología | 104 | 10.2. Tipología | 156 |
| 2.3. Elementos configuradores | 31 | 6.3. Elementos configuradores..... | 105 | 10.3. Recomendaciones de diseño | 159 |
| 2.4. Almacenamiento y depuración terciaria..... | 33 | 6.4. Condicionantes de diseño | 107 | 10.4. Ejemplo representativo | 160 |
| 2.5. Ejemplo representativo | 40 | 6.5. Recomendaciones de diseño..... | 109 | Explotaciones ganaderas | 162 |
| 2.6. Ficha comparativa | 43 | 6.6. Ejemplo representativo | 113 | 10.5. Tipología | 162 |
| 3. Pavimentos..... | 44 | 6.7. Ficha comparativa | 117 | 10.6. Recomendaciones de diseño | 164 |
| 3.1. Tipología | 46 | 6.8. Resumen..... | 118 | 10.7. Ejemplo representativo | 167 |
| 3.2. Directorio de pavimentos continuos..... | 47 | 7. Vialidad invernall..... | 120 | Instalaciones deportivas..... | 168 |
| 3.3. Directorio de pavimentos discontinuos | 54 | 7.1. Justificación | 121 | 10.8. Tipología | 168 |
| 4. Elementos urbanos..... | 60 | 7.2. Tipología | 122 | 10.9. Recomendaciones de diseño | 170 |
| 4.1. Justificación | 61 | 7.3. Recomendaciones de diseño | 123 | 10.10. Ejemplo representativo..... | 173 |
| 4.2. Tipología | 62 | 7.4. Ejemplo representativo | 126 | 10.11. Ficha comparativa..... | 175 |
| 4.3. Recomendaciones de diseño..... | 64 | 8. Contención de terrenos | 128 | Bibliografía..... | 176 |
| 4.4. Ejemplo representativo | 71 | 8.1. Justificación | 129 | | |
| 4.5. Ficha comparativa | 74 | 8.2. Tipología | 130 | | |
| | | 8.3. Recomendaciones de diseño | 132 | | |



Prólogo

El agua es algo más que un recurso escaso e imprescindible. Es el soporte básico de la vida. Su utilización sostenible es esencial para la viabilidad de la condición humana. Necesitamos el agua. Pero el agua no es nuestra. El aumento demográfico acelerado, la necesidad de asegurar un suministro de alimentos en cantidad y en calidad, la transformación de espacios naturales en espacios humanizados, provocan cada vez más conflictos en su uso. Unos conflictos de uso que se verán potenciados por el cambio global, y su correlato de irregularidades climáticas y geomorfológicas, de alteraciones ecosistemáticas radicales, y de proliferación de sequías e inundaciones. Todo apuesta a pensar que el agua será algo más que un recurso escaso en las próximas décadas. Será, como lo ha sido a lo largo de la historia pero con mucha mayor intensidad, el principal argumento modelador de las dinámicas humanas. Y precisaremos respuestas, muchas respuestas.

En el Grupo Tragsa creemos poder aportar algo en ese aprender a hacer un buen uso del agua. Una trayectoria de más de 40 años, y un equipo profesional altamente cualificado, nos habilita para desarrollar trabajos en pro

de un uso equilibrado de los recursos hídricos. Además, nuestra acrisolada visión medioambiental nos hace ser especialmente sensibles a priorizar en toda nuestra actividad la conservación de los recursos naturales.

En ese contexto general, la gestión integral del agua en los entornos humanizados, cada vez con mayor incidencia territorial, es cuestión a la que concedemos especial importancia. Nos hemos marcado como reto el avanzar soluciones que minimicen la alteración del ciclo natural del agua. Con esa intención ya se desarrolló en su día el proyecto de I+D+i "Gestión Integral del Agua en Entornos Edificados (GIAE)". Fruto del mismo se publicó un primer cuaderno tecnológico en 2015 que ahora ve una nueva edición.

Esta publicación, eminentemente práctica y visual, ya recogía criterios de diseño, así como soluciones sencillas para responder a los problemas que las áreas transformadas por el hombre, tanto edificadas como no edificadas, conllevan en relación con una gestión sostenible de los recursos hídricos. Tratamos de ser más precisos y concretos, e incorporamos

propuestas de mayor calado tecnológico e innovador. El Grupo Tragsa no puede ser, no es, y no pretende ser, una empresa constructora, pero entendemos que nuestro compromiso con lo ambiental, desde nuestra unívoca vocación de servicio público al servicio de las administraciones públicas, no nos resta capacidad para tratar de aportar escenarios de respuesta a los problemas que el futuro del agua nos va a plantear a todos, en todos los ámbitos, y en cualquier lugar del territorio, tal y como nos orienta nuestro objeto social.

Por último, quiero agradecer a todas las personas que han contribuido en su elaboración el esfuerzo realizado. Incluyo aquí tanto a los intervinientes del Grupo Tragsa como, obviamente, a los colaboradores del Grupo de Arquitectura Bioclimática en un entorno sostenible (ABIO) de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Sin ese esfuerzo y dedicación, este trabajo no habría sido posible.

Jesús Casas Grande
Presidente del Grupo Tragsa

1. Aspectos generales

La gestión integral del agua de lluvia en entornos humanizados engloba los criterios básicos de diseño para su mejor aprovechamiento bajo las premisas de mejora ambiental, gestión hídrica adecuada, recuperación del ciclo natural del agua y prevención de problemas climáticos.

El proyecto de Investigación, Desarrollo e Innovación dentro del cual se ha desarrollado esta guía ha sido realizado por la Subdirección de Ingeniería y Edificación de Tragsatec en colaboración con el Grupo de Arquitectura Bioclimática de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid bajo la coordinación de la Subdirección de Innovación y Desarrollo de Servicios del Grupo Tragsa.

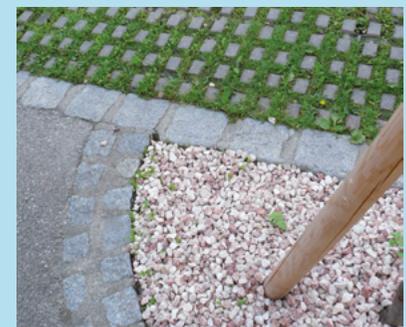


Figura 1. Acabados permeables.

1.1. Objetivo y justificación

En esta publicación proponemos un modelo que engloba las técnicas de aprovechamiento y gestión del agua de lluvia en entornos rurales y periurbanos, a lo largo de todo su recorrido, analizando y reconsiderando cada fase del ciclo artificial del agua, e incorporando nuevos sistemas y dispositivos.

Este planteamiento reúne las técnicas relacionadas con la gestión del agua en un modelo único, y representa un salto cualitativo en el diseño urbano.

La ausencia de gestión del agua de lluvia tiene múltiples consecuencias: la degradación del entorno urbano, la pérdida cualitativa y cuantitativa de acuíferos, la alteración del ciclo natural del agua, el aumento de pérdidas económicas, etc. Todas ellas se agrupan en los siguientes puntos:

El ciclo urbano del agua. El ciclo natural del agua en entornos edificados se ha perdido: las precipitaciones atraviesan una nube de contaminación, llegan a un suelo prácticamente

impermeable, arrastran toda la suciedad acumulada, y la transportan por conducciones estancadas hasta depuradoras que intentan recuperar la calidad de un agua completamente degradada mediante costosos procesos, para devolverla finalmente al río o mar.

En este recorrido no se han tenido en cuenta las posibilidades de infiltración del agua al terreno, la capacidad depuradora del suelo, las necesidades hídricas de la vegetación, los beneficios medioambientales de la evapotranspiración o los circuitos hídricos preexistentes.

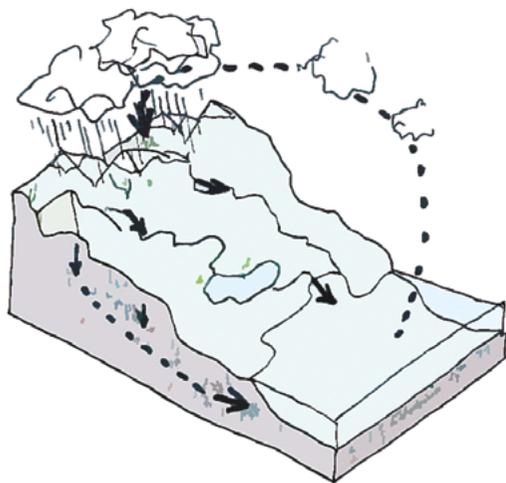


Figura 2. Ciclo natural del agua. Fuente: Unesco publishing.

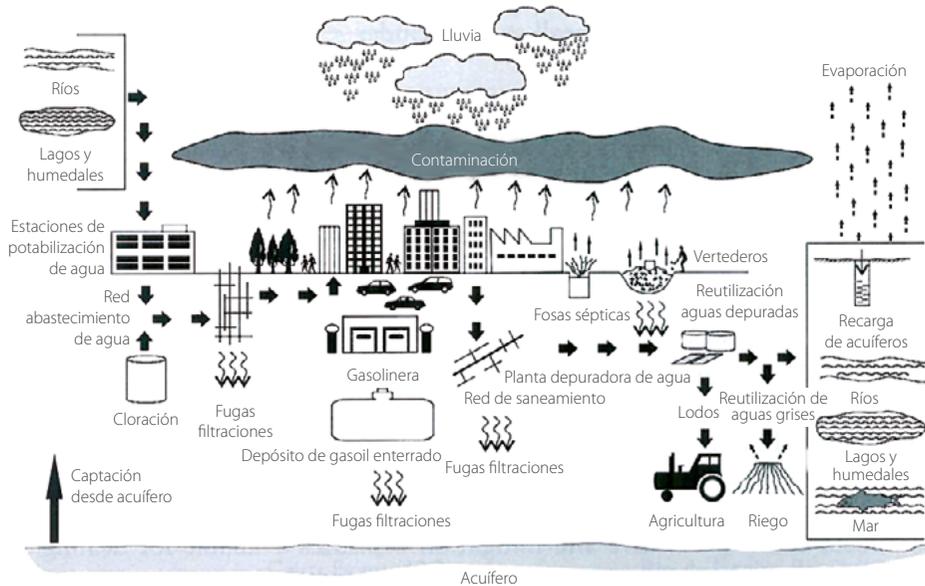


Figura 3. Ciclo urbano del agua. Fuente: Unesco publishing.



Figura 4. Consecuencias del modelo actual de urbanización. Fuente: El Mundo.



Figura 5. Incremento de escorrentía superficial según impermeabilización superficial.

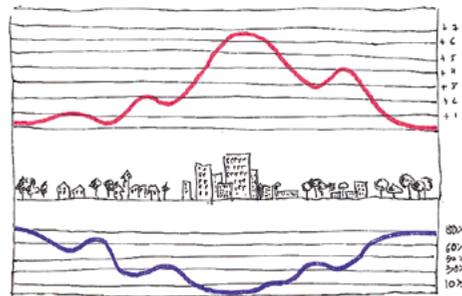


Figura 6. Incremento de temperaturas y capacidad de infiltración.



Figura 7. Termografía de Madrid. Fuente: *El clima urbano*. MOPT.

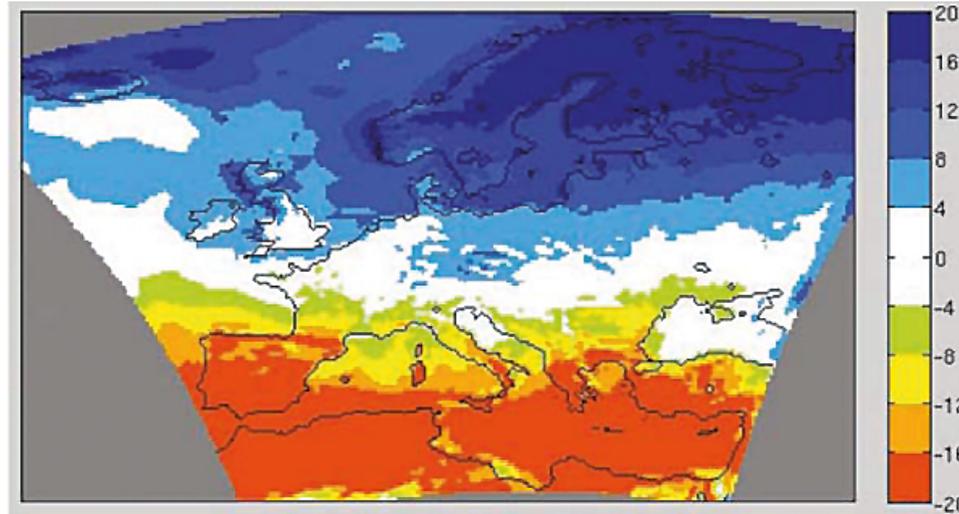
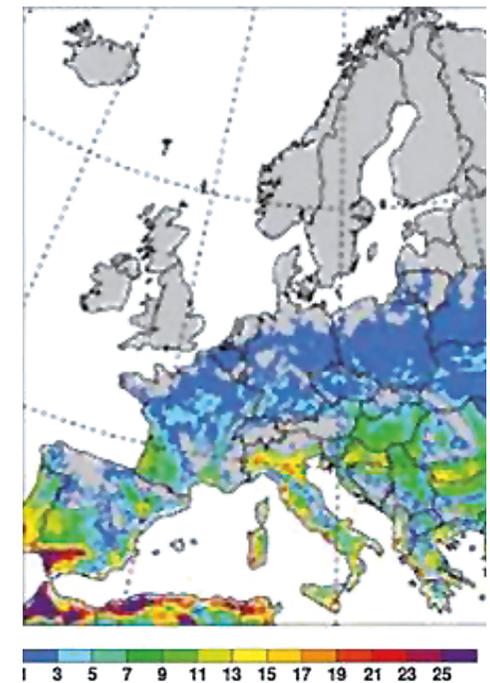


Figura 8. Cambios en precipitación anual (%). Período 2071-2100 vs 1961-1990. Fuente: www.ensembles-eu.org.

Figura 9. Número previsto de días que superan la temperatura aparente, índice de calor, umbral de 40,7 °C en verano. Fuente: www.ensembles-eu.org.

| **La adaptación al cambio climático.** El consenso actual respecto a la evolución climática para España augura un aumento de la temperatura media, una notable disminución de las precipitaciones, un incremento de su torrencialidad, la modificación de los periodos estacionales y el avance de la desertización (aumento de la temperatura del suelo y riesgo de incendios, y disminución de la humedad).

Las infraestructuras dependientes de las condiciones climáticas y, especialmente las relacionadas con el agua, van a quedar so-



bre o infra dimensionadas, y las condiciones constructivas de los asentamientos deberán modificarse para adaptarse a condiciones climáticas distintas de las consideradas inicialmente.

El incremento del gasto. La inundación, provocada por la concentración puntual de la escorrentía, genera gastos por desperfectos en infraestructuras y edificaciones, por la intervención de los servicios de emergencias y por la necesidad de construir dispositivos para afrontar las avenidas.

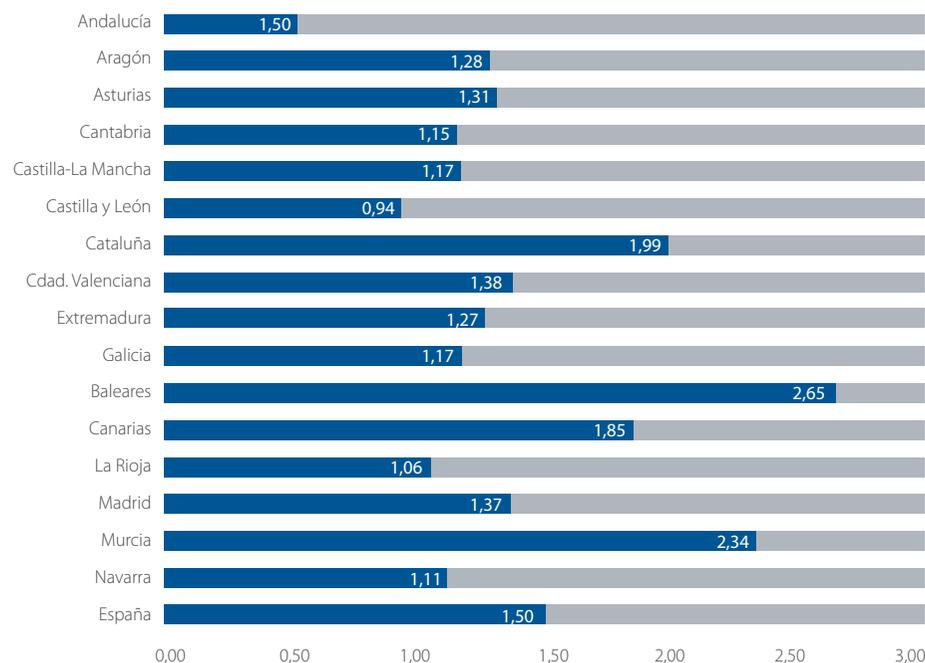
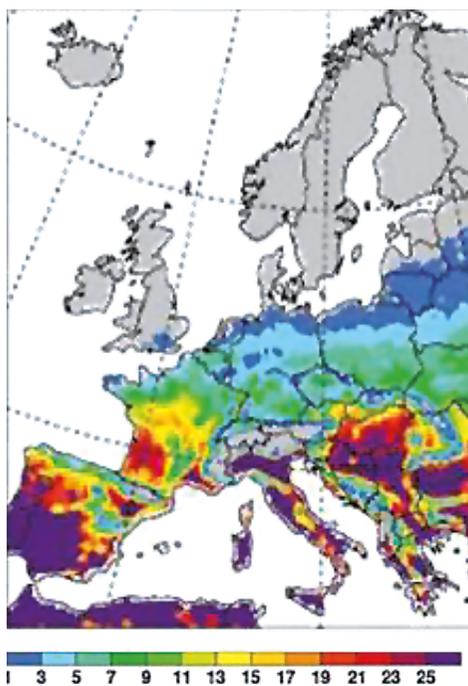


Figura 10. Tarifas (€/m³) por Comunidades Autónomas. Fuente: Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamientos (AEAS).

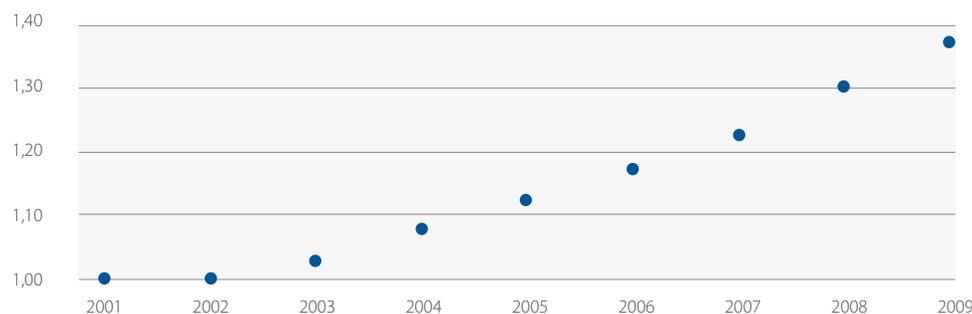


Figura 11. Evolución de la tarifa del agua. Fuente: AEAS.

En periodo de sequía, la pérdida de infiltración provoca una disminución de la humedad del suelo, incrementándose las necesidades de riego en parques y jardines.

En otros casos el exceso de impermeabilización hace necesaria una constante limpieza de estas superficies por los servicios municipales.

Además, la relación entre la calidad del aire y la gestión del agua produce un aumento del gasto en atención sanitaria, especialmente en grandes ciudades y su entorno.

Por último, el coste del agua en España, reconocido como bajo actualmente, está distribuido de manera desigual entre las distintas regiones y su tendencia, tanto en abastecimiento como en saneamiento, es creciente según las previsiones climáticas.

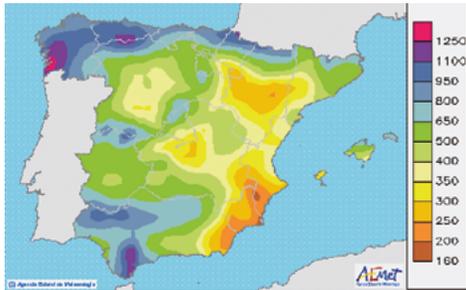


Figura 12. Precipitación acumulada en un periodo.



Figura 13. Avance de la desertificación. Fuente: Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).



Figura 14. Índice de torrencialidad. Fuente: Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

1.2. Escenario de aplicación

Climatología

La complejidad climática de España permite entender la necesidad de adoptar diferentes estrategias frente al agua de lluvia.

El tratamiento del agua de lluvia en entornos edificados debe adaptarse a las condiciones de cada lugar, conforme a las características climatológicas y geomorfológicas propias.

Las precipitaciones se producen de manera diferenciada en cuanto a distribución temporal y cantidad recogida. Además las diferencias en cuanto a temperatura y su incidencia en la evaporación y la desertificación añaden otras variables a los condicionantes climatológicos.

Para poder afrontar el desarrollo de estrategias para la gestión del agua de lluvia se adopta como criterio la división simplificada de la climatología española en tres grandes zonas:

- | **Zona A.** Precipitaciones frecuentes, torrencialidad puntual y riesgo medio de inundaciones.
- | **Zona B.** Precipitaciones habituales (estacionales), torrencialidad esporádica y riesgo medio de inundaciones, sequías y desertificación.
- | **Zona C.** Precipitaciones esporádicas y episodios de torrencialidad e inundaciones con un elevado riesgo de desertificación y sequía.

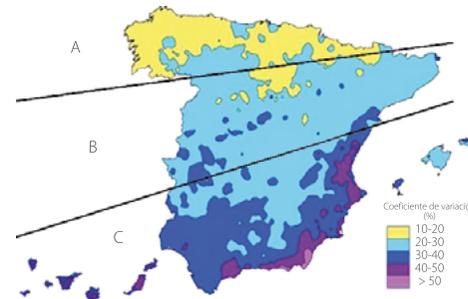


Figura 15. División geográfica según la variación de la precipitación.

Permeabilidad del terreno

El grado de permeabilidad del terreno se define según su capacidad de drenaje, conforme al coeficiente de permeabilidad (k):



| Permeabilidad | Valor K (cm/seg) |
|---------------|------------------|
| Alta | $> 10^1$ |
| Media | 10^1 a 10^5 |
| Baja | $< 10^5$ |



Figura 17. Permeabilidad en España. Fuente: Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

| | Precipitaciones (mm) | | | |
|--------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| | Precipitación media (mensual) | Precipitación media (anual) | Precipitación máxima | Precipitación mínima |
| Zona A | 79,14 | 949,72 | 357,86 | 0,50 |
| Zona B | 37,47 | 449,58 | 221,89 | 0,00 |
| Zona C | 32,92 | 395,05 | 304,64 | 0,00 |

Figura 16. Valores medios de precipitaciones obtenidos valorando diversas capitales de provincia de cada zona. Fuente: *Guía resumida del clima en España* (1971-2000). Plan Estadístico Nacional (2001-2004), Ministerio de Medio Ambiente.

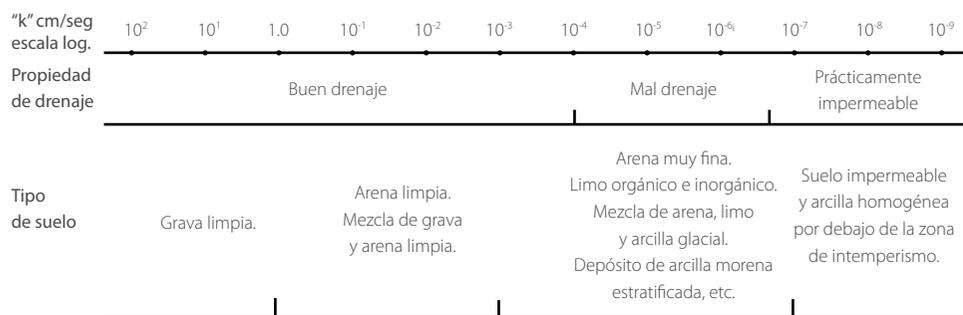


Figura 18. Coeficiente de permeabilidad. Fuente: Juárez B. y Rico R. *Mecánica de Suelos*.

Morfología del terreno

El relieve, la permeabilidad, la vegetación y la capacidad de almacenaje de agua también afectan al comportamiento de la lámina de agua.

| | Valores de K | | | |
|----------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|
| Relieve de terreno | 40 Muy accidentado (pendiente > 30 %) | 30 Accidentado (pendiente entre 10 y 20 %) | 20 Ondulado (pendiente entre 5 y 10 %) | 10 Llano (pendiente < 10 %) |
| Permeabilidad del suelo | 20 Muy impermeable (roca) | 15 Bastante impermeable (arcilla) | 10 Bastante permeable | 5 Muy permeable (arena) |
| Vegetación | 20 Ninguna | 15 Poca (menos del 10 % de superficie) | 10 Bastante (hasta el 50 % de superficie) | 5 Mucha (hasta el 90 % de superficie) |
| Capacidad de almacenaje de agua | 20 Ninguna | 15 Poca | 10 Bastante | 5 Mucha |

Figura 19. Valores de K conforme a la morfología de terreno. Fuente: Juárez B. y Rico R. *Mecánica de Suelos*.

Escurrentía

El coeficiente de escurrentía (lámina de agua que circula sobre la superficie en una cuenca de drenaje) varía en función del acabado superficial.

| Tipo de superficie | Coefficiente de escurrentía |
|------------------------------------|-----------------------------|
| Zona arbolada y bosque | 0,10 a 0,20 |
| Zona con vegetación densa | |
| Terreno granular | 0,05 a 0,35 |
| Terreno arcilloso | 0,15 a 0,50 |
| Zona con vegetación media | |
| Terreno granular | 0,10 a 0,50 |
| Terreno arcilloso | 0,30 a 0,75 |
| Tierra sin vegetación | 0,20 a 0,80 |
| Zona cultivada | 0,20 a 0,40 |
| Superficie de grava | 0,15 a 0,30 |
| Adoquinado | 0,50 a 0,70 |
| Pavimento de hormigón y bituminoso | 0,70 a 0,95 |

Figura 20. Coeficiente de escurrentía. Fuente: S. M. Woodward and C. J. Posey *"Hydraulics of steady flow in open channels"*.

Tabla resumen

Los condicionantes para la planificación de la gestión del agua quedan resumidos en la siguiente tabla y definen las zonas de referencia utilizadas en el resto de apartados.

| | Terreno impermeable (K < 10 ⁻⁵) | Terreno permeable (K > 10 ⁻⁵) |
|---------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Zona A | Precipitaciones frecuentes con gran intensidad | Precipitaciones frecuentes con gran intensidad |
| Zona B | Precipitaciones esporádicas con intensidad media | Precipitaciones esporádicas con intensidad media |
| Zona C | Precipitaciones esporádicas con gran intensidad | Precipitaciones esporádicas con gran intensidad |

Figura 21. Tabla resumen de condicionantes climáticos y morfológicos.

1.3. El modelo de gestión

El recorrido del agua por los entornos humanizados presenta multitud de situaciones diferentes en las que una adecuada construcción determina la calidad y cantidad de agua que se recibe “aguas abajo”.

El aparcamiento de una estación de esquí, un camino de acceso a campos de cultivo, la plaza de un pueblo, un polideportivo, la parcela de un chalet, un polígono industrial, los tejados de una nueva urbanización, las pistas de un aeropuerto, las cunetas de las carreteras, la zona de carga y descarga de un centro comercial o su aparcamiento, los parques y jardines de una ciudad, o la pista de acceso a una playa representan una pequeña muestra de los lu-

gares donde la intervención humana afecta al ciclo pre-existente del agua.

El modelo propuesto busca los puntos sensibles en los que el modo de urbanizar afecta notablemente al comportamiento del agua de lluvia recibida, y propone pautas de diseño para su mejora, centrándose especialmente en el exterior de la edificación y en zonas que no se encuentren en núcleos urbanos consolidados. Todos ellos se engloban en los apartados que desarrollamos a continuación. Cada apartado incorpora definición y tipología, problemática específica y recomendaciones de diseño para la mejora de la gestión del agua de lluvia, así como un ejemplo representativo.

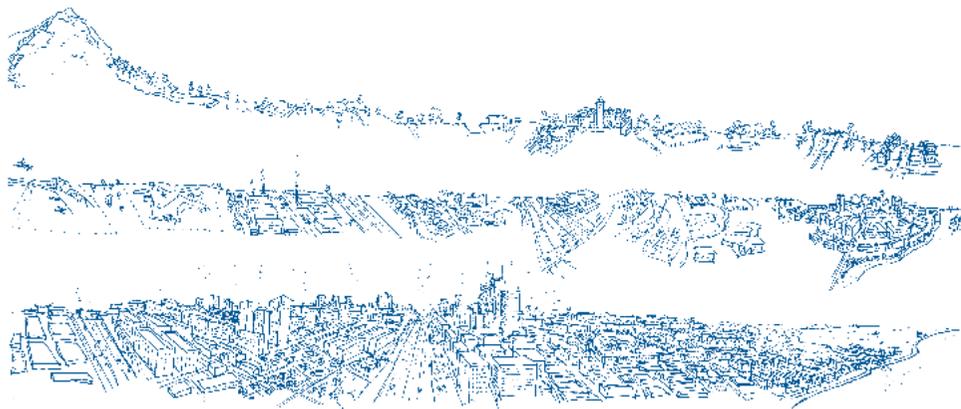


Figura 22. Recorrido del agua por entornos humanizados.

| **Almacenamiento de agua.** Estudio de los distintos tipos de almacenamiento de agua (balsa, depósito y humedal), de las posibilidades que proporciona al diseño urbano y de la idoneidad según la función prevista y el lugar de implantación. Incluye además un apartado sobre la depuración vegetal del agua.



Figura 23. Balsa de regadío.

| **Elementos urbanos y pavimentos.** Alcorques, rotondas, medianas, aceras, bulevares, zonas verdes, plazas y zonas de estancia son lugares en donde se puede mejorar el comportamiento del agua de lluvia. Se presentan alternativas compatibles con la red habitual de saneamiento. El directorio de acabados superficiales se centra en la capacidad de infiltración e influencia en la escorrentía superficial. Destaca la importancia de la elección del material según los condicionantes climáticos y geomorfológicos, así como el comportamiento higratérmico.



Figura 24. Ejemplo de jerarquización de superficies.

| **Cubiertas y fachadas vegetales.** Disminuyen notablemente el efecto de la escorrentía y mejoran el ambiente y el paisaje urbano, además de fomentar el ahorro energético, incrementar la biodiversidad, mitigar el efecto “isla de calor” o facilitar la fijación del carbono. Se presenta su tipología y adecuación a las distintas situaciones y las pautas para su diseño en obra nueva y rehabilitación.



Figura 25. Cubierta vegetal.

| **Aparcamientos y vialidad invernal.** Su omnipresencia y acabado superficial, habitualmente bituminoso, convierte este apartado en primordial. La jerarquización de superficies según temporalidad de uso, la vegetación como sombra, el tratamiento vegetal o la recogida de agua para riego son algunas de las medidas descritas que mejoran notablemente la gestión del agua en estos espacios.

En el caso particular de la vialidad invernal, los aparcamientos de emergencia o la elección de materiales fundentes alternativos a la salmuera forman parte de las medidas propuestas.



Figura 26. Aparcamiento.

| **Caminos y contención de terreno.** Los caminos suponen una barrera al transcurso natural del agua.



Figura 27. Efecto del agua en camino rural.

El análisis de los elementos configuradores permite proponer variantes de diseño que compatibilizan su uso con la gestión del



Figura 28. Explotación ganadera.

agua de lluvia que reciben. En los taludes se plantean mejoras en el diseño de la cabeza, cuerpo y pie.

| **Instalaciones.** Analiza la repercusión de este tipo de recintos (almacenes, zonas de intercambio de mercancía, puntos limpios, explotaciones ganaderas o zonas deportivas) –que ocupan grandes superficies de terreno– en el ciclo del agua y las alteraciones que provocan.

Construcción del modelo

El conjunto de apartados descritos constituyen el modelo de gestión, e incluye también para cada medida propuesta, el alcance o relevancia territorial, el grado de recomendación, los objetivos específicos y su finalidad, los aspectos de mejora conseguidos, las carencias y problemas asociados, según el siguiente desarrollo:

Relevancia territorial

- I. Alcance supramunicipal. Relevante para el acuífero.
- II. Alcance municipal. Relevante para recursos locales.
- III. Alcance puntual.
- IV. No dependiente de territorio.

Grado de recomendación

- A. Extremadamente recomendable.
- B. Bastante recomendable.
- C. Recomendación no prioritaria.
- D. Recomendación prescindible.

Finalidad

- | Almacenar agua de lluvia.
- | Mejorar la calidad ambiental.
- | Descontaminar.
- | Recargar el acuífero.
- | Evitar y prevenir la erosión.
- | Ralentizar la escorrentía.

Aspectos de mejora

- | Cadena de gestión: prevención, translación, pretratamiento, control en origen, control del sitio y control de cuenca.
- | Cantidad de agua: transporte, detención, infiltración y captación.
- | Calidad del agua: sedimentación, filtrado, adsorción, biodegradación, volatilización, precipitación, absorción vegetal y nitrificación.
- | Beneficio medioambiental: estético, amabilidad y ecológico.

| | | TIPOLOGÍA | | CATEGORÍA | |
|--------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------|-----|
| | | | | (1) | (2) |
| ÁMBITO DE ACTUACIÓN | ESCALA AÉREA | Reducción emisiones contaminantes Planteamiento urbano e incidencia aérea | I I | A A | |
| | ESCALA SUPERFICIAL | Mejoras en edificación Mejoras en urbanismo | III I | A A | |
| | ESCALA SUBTERRÁNEA | Infiltración Control de contaminación acuífero | I I | A A | |
| ALMACENAMIENTO DE AGUA | HUMEDALES | Humedales naturales Humedales artificiales | II I | B A | |
| | BALSAS | Balsas naturales | II | B | |
| | | Balsas impermeabilizadas con tela | II | B | |
| | | Balsas impermeabilizadas con arcilla | II | B | |
| | | Balsas impermeabilizadas y cubiertas | II | D | |
| | | Pozas | III | C | |
| | | Charcas | III | C | |
| | DEPÓSITOS | Bebederos | III | C | |
| | | Depósitos de superficie | II | A | |
| | | Depósitos enterrados | II | B | |
| PAVIMENTOS | Pavimentos porosos | II | A | | |
| | Pavimentos drenantes | II | B | | |
| | Pavimentos discontinuos junta cerrada | II | A | | |
| | Pavimentos discontinuos junta abierta | II | B | | |
| | Pavimentos continuos | II | A | | |
| ELEMENTOS URBANOS | Caballones | IV | A | | |
| | Alcorques | IV | A | | |
| | Repoblación autóctona | IV | B | | |
| | Terrazas | II | B | | |
| | Bancales | II | B | | |
| | Atochales | II | B | | |
| | Boqueras | II | B | | |
| CUBIERTAS Y FACHADAS VEGETALES | Cubiertas intensivas | IV | A | | |
| | Cubiertas extensivas | IV | A | | |
| | Fachadas vegetales | IV | A | | |
| APARCAMIENTOS | Aparcamientos lineales | II | B | | |
| | Aparcamientos superficiales temporales | II | A | | |
| | Aparcamientos superficiales permanentes | II | A | | |
| VIALIDAD INVERNAL | Aparcamientos de vialidad invernal | II | A | | |
| | Zonas de almacenamiento de fundentes | II | A | | |
| | Zonas de almacenamiento de equipos | II | B | | |
| CONTENCIÓN DE TERRENOS | Contención continua | III | A | | |
| | Contención con elementos prefabricados | III | B | | |
| CAMINOS | Caminos forestales | I | A | | |
| | Caminos rurales | I | A | | |
| | Vías pecuarias | I | B | | |
| | Sendas ciclistas | I | B | | |
| | Sendas peatonales | II | A | | |
| INSTALACIONES | ALMACENAMIENTO DE MATERIALES | Almacenes de material de construcción | II | C | |
| | | Puntos limpios | III | B | |
| | | Almacenes de mercancías | II | B | |
| | | Almacenes de vehículos o neumáticos | II | C | |
| | EXPLOTACIONES GANADERAS | Explotaciones intensivas | III | A | |
| | | Explotaciones extensivas | II | B | |
| | INSTALACIONES DEPORTIVAS | Instalaciones deportivas cubiertas | II | A | |
| | | Instalaciones deportivas exteriores | II | A | |

| CARENCIAS / PROBLEMAS DETECTADOS | |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CASUÍSTICA | |
| | Escasa implantación. |
| | Ausencia de recarga artificial. Pocas actuaciones preventivas. |
| | Ausencia de recarga artificial. |
| | Actuaciones exclusivas de riego. Unidireccionalidad. |
| | Ausencia de mantenimiento, recarga e infiltración. |
| | Uso antiguo abandonado. Uso exclusivo para riego. Estancos e inaccesibles. Poca implantación en España. |
| | Influencia higrotérmica apenas considerada en diseño. Constucción habitualmente impermeable, con canalización directa a redes urbanas sin pretratamiento ni medidas de ralentización o almacenamiento. |
| | Elementos apenas considerados como sistema de tratamiento, almacenamiento e infiltración. Normalmente no conectados entre sí. Poco aplicado en zonas urbanas. |
| | Ausencia de implantación. |
| | Superficies impermeables Grandes extensiones impermeables y de ocupación esporádica. Fuerte impacto ambiental. Grandes extensiones impermeables. Fuerte impacto ambiental. |
| | Actuaciones impermeables y homogéneas de gran impacto. Contaminación de acuífero. |
| | Medidas agresivas, artificiales, con problemas derivados por erosión, concentración de escorrentía y nula infiltración. |
| | Cunetas continuas. Ausencia de infiltración o almacenamiento. Barrera a cursos naturales de escorrentía. Rotura de ciclo natural de agua previo a la actuación. Ausencia de tratamiento de contaminación y almacenamiento. Problemas de erosión, rotura de escorrentía natural y ausencia de almacenamiento. |
| | Grandes superficies sin tratamiento de concentración de escorrentía o contaminación. Exceso de impermeabilización. No diferenciación/jerarquización conforme a usos o tránsito. |
| | Captación de agua de lluvia no aprovechada. Contaminación por purines y compactación. |
| | Captación de agua de lluvia no aprovechada. Agua de lluvia no aprovechada. Exceso de impermeabilización. |

(1) Relevancia territorial

- I. Alcance supramunicipal. Relevante para el acuífero.
- II. Alcance municipal. Relevante para recursos locales.
- III. Alcance puntual.
- IV. No dependiente de territorio.

(2) Grado de recomendación

- A. Extremadamente recomendable.
- B. Bastante recomendable.
- C. Recomendación no prioritaria.
- D. Recomendación prescindible.

(3) Finalidad

- Almacenar agua de lluvia.
- Mejorar la calidad ambiental.
- Descontaminar.
- Recargar el acuífero.
- Evitar y prevenir la erosión.
- Ralentizar la escorrentía.

| OBJETIVO | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| MODELO | FINALIDAD (3) |
| | Almacenar Mejora ambiente Descontaminar Recarga acuífero Antierosión Ralentizar curso |
| Medidas preventivas a implantar en cualquier actuación urbana. El objetivo final es ralentizar la escorrentía, infiltrar el agua superficial, recuperar el nivel y calidad del freático y volver al ciclo del agua previo a las modificaciones del territorio. | |
| Recarga artificial controlada. Nuevos espacios naturales para almacenamiento temporal. | |
| Almacenamiento puntual de agua en caminos. Utilidad como abrevadero y nuevo foco de biodiversidad. Prevención contra incendios. Puntos de infiltración a terreno. | |
| Ralentización, infiltración, pretratamiento. Mejora de la calidad y cantidad de agua. | |
| Nuevos diseños y oportunidades de modelos, incorporación de uso faunístico, acumulación e infiltración, implantación en entornos rurales como fuente de acometida. | |
| Idóneo sobre terreno permeable. Primera opción en superficies urbanizadas. Ralentizar escorrentía. Derivar a zonas colindantes. Valorar las juntas como medida de infiltración y ralentización. Incluir zonas puntuales de descarga y tratamiento. | |
| Recuperar técnicas tradicionales. Interconectar. Interconectar y potenciar capacidad de infiltración. Medida a incorporar por defecto en toda actuación territorial. | |
| Recuperar técnicas tradicionales para el aprovechamiento del agua de lluvia. Incorporarlas al diseño urbano. Interconectar medidas para generar un sistema preventivo-acumulativo y complementario de la red general de evacuación. | |
| Primera superficie urbana de detección y captación. Aprovechamiento de agua de calidad. Nuevos espacios urbanos de calidad. Mejora del ambiente y paisaje. | |
| Permeabilizar, diseñar y diferenciar zonas según uso y tránsito. Incorporar materiales discontinuos, incluir pretratamiento de contaminantes, infiltrar a terreno o a red de aprovechamiento. | |
| Diferenciar superficies según uso y temporalidad. Incorporar medidas correctoras y de pretratamiento. Utilizar materiales de mantenimiento alternativos no contaminantes. | |
| Modificar el modelo de contención para conseguir infiltración, luchar contra la erosión, ralentizar, pretratar y conducir hacia zonas de almacenamiento. | |
| Reconducir y almacenar agua. Infiltrar agua al terreno. Eliminar barreras a la escorrentía natural. Pretratamiento y filtrado. Almacenamiento puntual en recorrido. Medidas de infiltración y almacenamiento. Tratamientos antierosivos. Inclusión de zonas de almacenamiento puntuales en recorridos. | |
| Incorporar pretratamiento, diferenciar permeabilidades de pavimentos según uso y temporalidad, transportar agua hasta puntos de tratamiento y almacenamiento. | |
| Incorporar depuración, utilización de efluentes para riego y uso del abono orgánico generado. Almacenar agua pluvial para limpieza y riego. | |
| Incorporar sistemas de almacenamiento y pretratamiento. | |

| ASPECTOS DE MEJORA (4) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|-------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------|--------------|-----------|---------------|----------|-----------|----------------|----------------|---------------|-------------------|---------------|----------|------------|-----------|--|
| CADENA DE GESTIÓN | | CANTIDAD DE AGUA | CALIDAD DE AGUA | | | BENEFICIO MEDIOAMBIENTAL | | | | | | | | | | | | | | | |
| Prevención | Translación | Pre-tratamiento | Control en origen | Control del sitio | Control de cuenca | Transporte | Detención | Infiltración | Captación | Sedimentación | Filtrado | Adsorción | Biodegradación | Volatilización | Precipitación | Absorción vegetal | Nitrificación | Estético | Amabilidad | Ecológico | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| (4) Aspectos de mejora | |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cadena de gestión | Prevención Translación Pre-tratamiento Control en origen Control del sitio Control de cuenca |
| Cantidad de agua | Transporte Detención Infiltración Captación |
| Calidad del agua | Sedimentación Filtrado Adsorción Biodegradación Volatilización Precipitación Absorción vegetal Nitrificación |
| Beneficio medioambiental | Estético Amabilidad Ecológico |



Figura 29. Distintos entornos urbanos y periurbanos.

1.4. Objetivos básicos

Los procesos de urbanización tienen una importante repercusión sobre el ciclo hídrico de la región donde se implantan. La gestión del agua en los desarrollos urbanísticos se ha centrado en el abastecimiento y en el saneamiento, obviando el comportamiento pre-existente del agua.

Con la idea de un “urbanismo cóncavo” como telón de fondo, se indican pautas generales para el diseño general urbano, analizando los niveles atmosféricos, superficiales y subterráneos.

Las medidas planteadas buscan mejorar la calidad y cantidad del agua de lluvia, y mantener o recuperar la relación de agua infiltrada y el agua de escorrentía previa a la actuación.

Calidad del agua

La disminución de la contaminación directa o difusa, controlando el origen o aplicando un diseño urbano que evite su incidencia y concentración en el acuífero supone una mejora en la calidad del agua.

Cantidad de agua

La reducción de la demanda y el aumento de la capacidad de retención del terreno son las claves. La concienciación y la incorporación de mecanismos de diseño adecuados favorecen la disminución del consumo de agua. Para recuperar e incrementar la capacidad de retención del agua en el terreno se plantean soluciones enfocadas a la recuperación y optimización de su capacidad permeable.

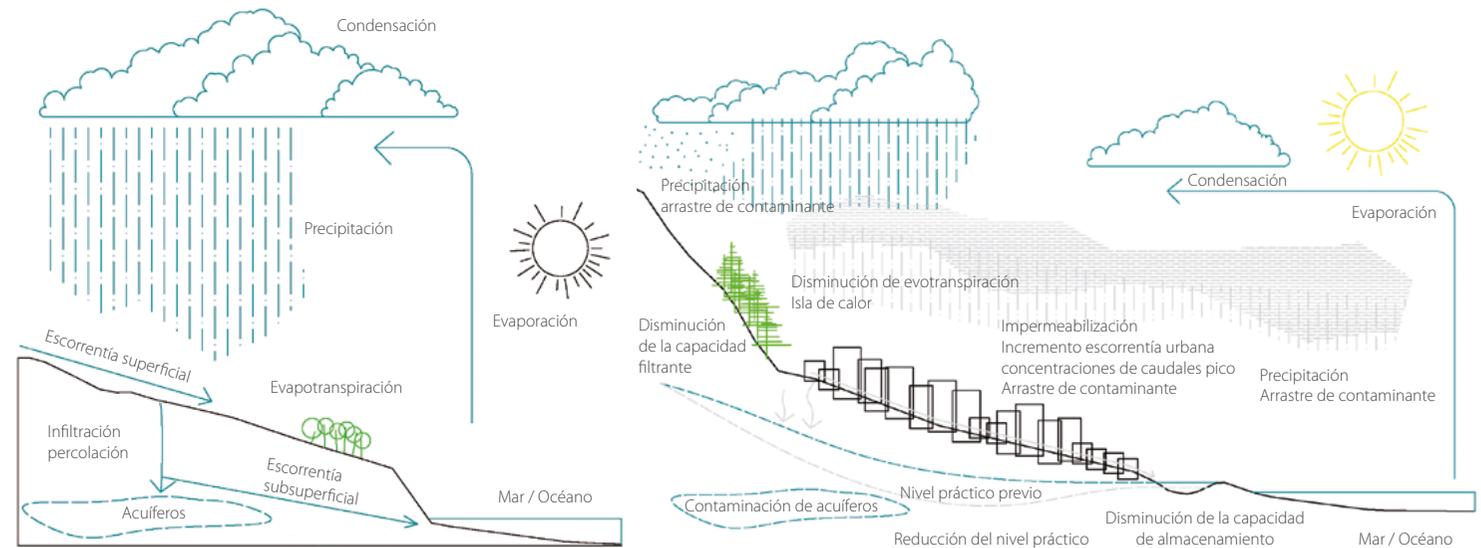


Figura 30. Ciclo hidrológico del agua en entornos urbanos. Repercusiones de la urbanización.

1.5. Recomendaciones de diseño

Además de las labores de concienciación por parte de las empresas distribuidoras de agua, y la creación de marcos normativos que modifiquen los criterios de diseño y mantenimiento urbano en relación con el agua, se plantean estrategias que deberán adecuarse a los condicionantes geográficos y socioculturales de cada localización, y que tienen que ver con parámetros de cantidad y calidad, como:

Calidad

El control de los focos de contaminación directa en las zonas industriales, aparcamientos, gasolineras y zonas de almacenamiento de residuos, etc.

La disminución de las emisiones relacionadas con la contaminación difusa del agua a través de la mejora de las instalaciones y los equipamientos, la limpieza urbana, la reutilización de agua en el mantenimiento de vías, etc.

Cantidad

La reducción de las superficies impermeables; la organización de las cuencas urbanas para evitar la concentración de grandes volúmenes de agua puntuales; el aprovechamiento del agua de lluvia y la reducción en la utilización de agua potable para usos que no la requieren.

El planteamiento urbano que incluya el aprovechamiento y la reutilización de las aguas pluviales, los procesos de infiltración, los humedales urbanos, etc.

El enfoque se resume en la reducción de la contaminación aérea, la reducción del consumo de agua y el incremento en la retención del agua de lluvia.

Reducción de la contaminación aérea

La contaminación puntual es más intensa en la zona donde se ubica la fuente y se disipa al alejarse.

Las características propias del lugar, como las corrientes de viento, las corrientes subterráneas, las grandes pendientes, etc., afectan a la incidencia de este tipo de contaminación y pueden trasladar el problema a otras zonas.

La contaminación difusa (fuente y/o área muy extensa y deslocalizada) se caracteriza por afectar a grandes áreas, a través de la acción de diversos focos, con frecuencia difícilmente identificables. Puede actuar de un modo lento pero progresivo y sobre zonas muy extensas. Su control presenta todavía mayores dificultades que la contaminación puntual.

El estancamiento de las partículas contaminantes en la atmósfera, en situaciones anticiclónicas y en combinación con planeamientos urbanos que no facilitan su dispersión, provoca, además de problemas respiratorios y niveles perniciosos de calidad de aire, el almacenamiento de contaminantes en el suelo durante periodos secos y lluvia ácida con arrastre de partículas en aire y suelo.

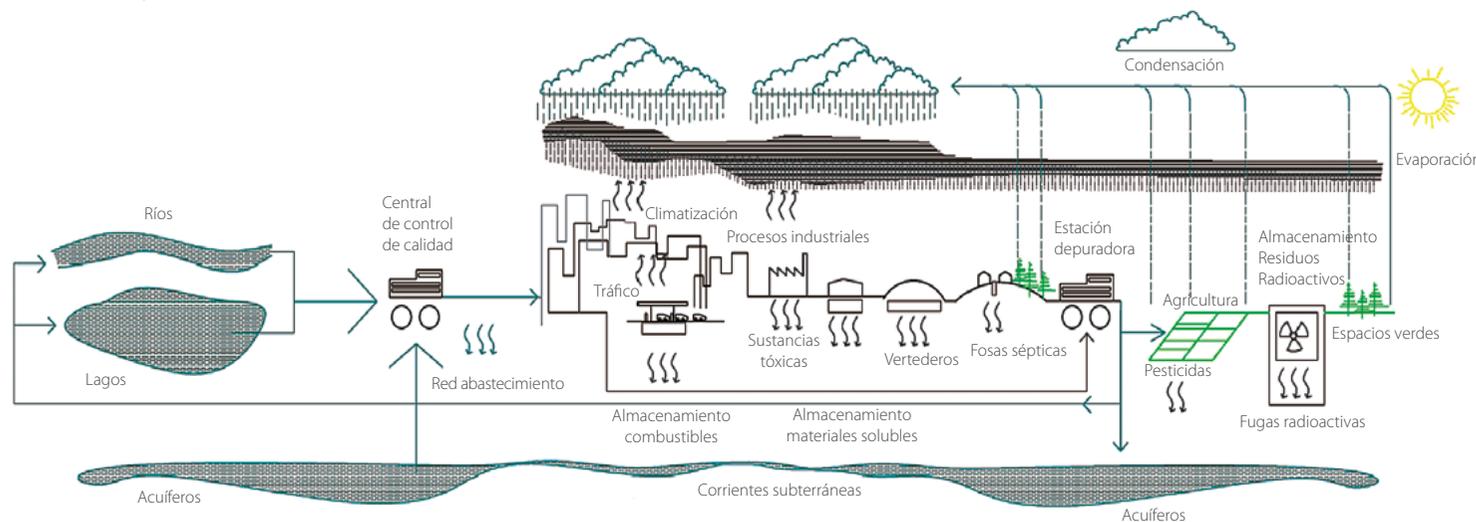


Figura 31. Ciclo urbano. Repercusiones de la urbanización.

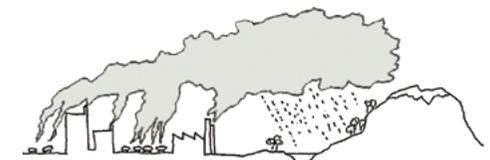


Figura 32. Contaminación aérea puntual y difusa.

Esta contaminación aérea se genera principalmente por las emisiones de dióxidos de nitrógeno, de azufre y partículas en suspensión de los vehículos a motor. En verano se incrementa por las altas concentraciones de ozono (niebla fotoquímica).

Los efectos que provoca son: la acidificación del suelo, el exceso de ozono troposférico, la eutrofización y el efecto invernadero.

| **La acidificación del suelo.** El dióxido de azufre, el óxido de nitrógeno y el amoníaco que proceden de centrales térmicas de combustibles fósiles, motores de coches, calefactores, plantas industriales o el estiércol, pueden reaccionar con el oxígeno atmosférico y disolverse en el agua de lluvia, produciendo la "lluvia ácida". En zonas con escasez de precipitaciones se produce la "deposición seca" o deposición directa sobre las hojas de árboles o suelo. Con la niebla se produce la "deposición oculta", cuya acidez puede llegar a ser diez veces superior a la de la lluvia. Las partículas contaminantes pueden ser transportadas a largas distancias.

| **El exceso de ozono troposférico.** En zonas con elevado número de horas de insolación, el óxido de nitrógeno puede intervenir junto con compuestos orgánicos volátiles (CVO) en complejas reacciones fotoquímicas, dando lugar a la formación de ozono troposférico, que es un contaminante secundario fuertemente oxidante. Se trata de un gas venenoso que daña cosechas, árboles y personas.

| **La eutrofización.** La deposición de nitrógeno procedente de las emisiones de óxidos de nitrógeno y amoníaco conduce a un excesivo nivel de nutrientes causando el declive de la biodiversidad. El exceso de nitrógeno también es un problema en mares y océanos, donde el desarrollo anormal de la masa de algas provoca el empobrecimiento en oxígeno.

| **El efecto invernadero.** El combustible fósil utilizado para la producción de energía es el principal responsable de la emisión de dióxido de carbono, metano y una gran proporción del óxido de nitrógeno que se emiten a la atmósfera y que favorece el efecto invernadero.

Para reducir las emisiones contaminantes aéreas se puede actuar en:

| **La climatización de edificios.** A través de la mejora del aislamiento y el cerramiento de los edificios y la sustitución de las viejas calderas de combustión (de carbón o gasóleo) se reducen las emisiones contaminantes en los edificios, responsables del 40 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero.

| **La minimización de las emisiones de los procesos industriales.**

| **La gestión del tráfico.** Entre las distintas medidas de mejora está plantear diseños urbanos no basados en el uso de vehículos utilitarios; favorecer el transporte público y no contaminante; no zonificar sectorialmente; hacer que predominen las zonas peatonales y divulgar dichas medidas sobre la población, incidiendo en la gran cantidad de emisiones que producen los vehículos con motor de combustión.

| **La adaptación urbana a la orografía.** El control de las densidades edificatorias en función de la topografía para evitar concentraciones de contaminantes en zonas pobladas.

| **Los vientos dominantes.** A través del diseño de viales y la definición de la posición y la altura de los edificios para la mejor dispersión y no estancamiento de los contaminantes.

| **El incremento de espacios vegetados.** Reduce considerablemente el fenómeno "isla de calor", favoreciendo la evapotranspiración, manteniendo la humedad relativa del entorno. Son sumideros de CO₂ y permiten interceptar partículas en suspensión.

Reducción del consumo de agua

El control del consumo de agua permite reducir la demanda y el vertido. Para reducir el consumo se deben implantar mecanismos para la reutilización de aguas grises y la acumulación de aguas de lluvia. Las medidas de concienciación son indispensables.

| **La reducción de demanda** tiene efectos en la reducción de transporte de agua desde otras áreas y la reducción del agua contaminada vertida.

| **La incorporación de sistemas de captación de aguas pluviales** posibilita su reutilización y la reducción del consumo de agua potable.

| **La incorporación de sistemas de tratamiento de aguas contaminadas** facilitan la reutilización en usos sin agua potable y la reducción de los consumos de agua potable.

Incremento en la retención del agua de lluvia

El exceso de impermeabilización del terreno provoca la pérdida de capacidad de retención del agua de lluvia, impide el crecimiento de la vegetación, disminuye la evapotranspiración e incrementa el efecto "isla de calor".

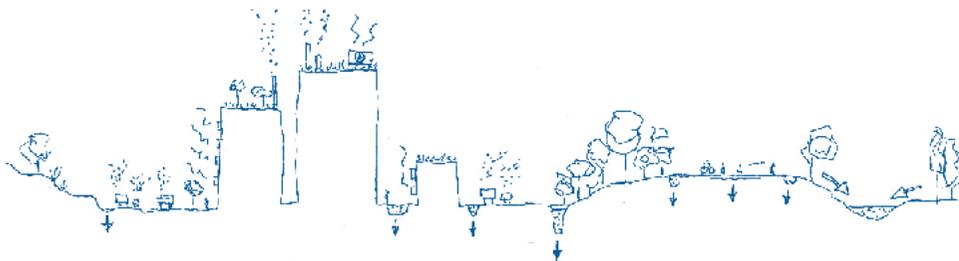


Figura 33. Puntos urbanos de intervención.

Además, aumenta la velocidad de escorrentía, la concentración esporádica de caudal en las inundaciones, el arrastre y la concentración de contaminación y la saturación de las redes urbanas de evacuación y de las estaciones de depuración de aguas residuales (EDAR).

La impermeabilización también afecta a la erosión del terreno, provocando la pérdida de capas vegetales superficiales y la pérdida de resistencia. A escala subsuperficial, repercute en la calidad y cantidad de agua del acuífero. Los ámbitos de actuación que analizaremos son el superficial y el subsuperficial.

Escala superficial

| **Envoltentes de edificios.** La intervención en la edificación también permite amortiguar el impacto del agua de lluvia, la escorrentía urbana y la erosión, mediante:

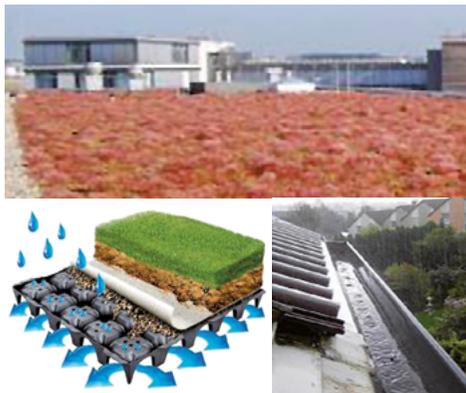


Figura 34. Cubierta extensiva, cubierta intensiva y canalón de grandes dimensiones.

- | La renaturalización de elementos arquitectónicos mediante cubiertas y fachadas vegetales.
- | La acumulación de agua encubiertas, aljibes o depósitos.
- | Mejora de los sistemas de conducción.

| **Control de contaminación superficial.** El tratamiento de los contaminantes arrastrados por el agua de lluvia puede realizarse en superficies vegetadas mediante biorremediación, recuperando zonas urbanas deterioradas.

| **Pavimentos permeables.** Junto con la envolvente de los edificios, el pavimento es el primer receptor del agua de lluvia, por lo que sus características determinan en gran medida el comportamiento de la escorrentía en el entorno urbano. Mayor permeabilidad favorece la infiltración y amortiguación de escorrentía.

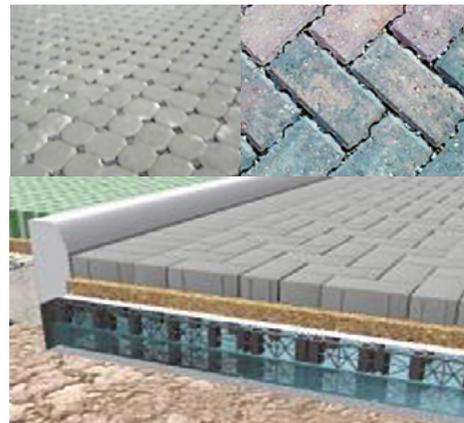


Figura 35. Pavimentos permeables.

| **Vegetación autóctona.** La incorporación de masas de vegetación autóctona permite mantener las condiciones higrotérmicas del entorno y mantener cohesivo el terreno, dificultando los procesos erosivos por escorrentía, y garantizando un mejor mantenimiento.

Escala subsuperficial

Una vez que el agua ha penetrado en el terreno, parte se mantendrá y evaporará, mientras que otra descenderá hasta el acuífero o discurrirá formando corrientes subsuperficiales hacia otras zonas. La calidad y cantidad se debe controlar en los siguientes aspectos:

| **La contaminación puntual.** Proviene principalmente de fuentes contaminantes superficiales como los depósitos de residuos tóxicos mal aislados, los vertederos de residuos urbanos, los vertederos industriales, el derribo de minas, las fugas en depósitos de combustible, los pozos sépticos y las acumulaciones de purines procedentes de las explotaciones ganaderas.

| **La contaminación difusa.** Su origen está en el uso excesivo de fertilizantes y pesticidas en agricultura, las fugas de aguas residuales domésticas, de productos industriales, de productos combustibles, las explotaciones de materiales radioactivos o tóxicos no controlados o con fugas.

| **El control de los acuíferos.** Los acuíferos presentan cierta capacidad de autodepuración

según el tipo de suelo, permitiendo que parte de las sustancias contaminantes arrastradas por el agua puedan ser filtradas y dispersadas a través del terreno, o incluso ser neutralizadas, oxidadas o reducidas según qué procesos químicos o biológicos favorezca el terreno. No obstante, la mejor actuación frente a la contaminación es la ejecución de medidas preventivas que protejan a los acuíferos e impidan la presencia en el terreno de altas concentraciones de elementos contaminantes.

| **El control de explotación.** La sobreexplotación lleva asociada problemas como la disminución del nivel freático, la posibilidad de contaminación del acuífero a través de la infiltración desde otras capas que anteriormente se encontraban a presiones inferiores, la intrusión de agua marina o las alteraciones geomorfológicas.

| **La recarga artificial.** Es una técnica para la mejora de la cantidad y calidad de agua, pero debe realizarse siempre de modo controlado, evitando la incorporación de sustancias que puedan favorecer su contaminación y con un diseño adecuado.

| **El control del flujo subterráneo.** Garantizar la continuidad del flujo subterráneo es una medida prioritaria en las aguas subterráneas. La sobreexplotación parcial del acuífero puede producir la interrupción de la corriente hídrica existente, con el consiguiente efecto negativo que provoca en la red subterránea.



Figura 36. Área de biorretención.



Figura 37. Zanja de biorretención.



Figura 38. Estanque de retención.

1.6. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) son elementos que mejoran el comportamiento hídrico dentro del entorno urbanizado, y forman parte de una “cadena de gestión” cuyo fin último es “detener, ralentizar, infiltrar y almacenar” el agua de lluvia. Es decir, recuperan el ciclo natural del agua. Destacan:

| **La zanja y el área de biorretención.** Zanja o zona puntual porosa, rellenas de material granular y/o tierra, con crecimiento de especies vegetales autóctonas que permiten la depuración del agua y facilitan su infiltración al terreno.

El área diseñada debe permitir el almacenamiento temporal del agua para que recupere la calidad adecuada, y la lámina superior no alcanzará los 15 cm de altura de seguridad en los extremos. La mitad del agua retenida en un momento pico deberá drenar en 24 horas. La profundidad máxima del punto más alto será de 1 m y es recomendable la incorporación de elementos de conexión entre diferentes zanjas.

| **El filtro de arena.** Disminuye la velocidad de la escorrentía mediante el paso del agua a través de una cama de arena que actúa como filtro.

La profundidad máxima será de 150 cm y mínima de 45 cm. La arena utilizada tendrá diámetros de entre 0,5 y 1 mm. La relación

ancho: largo de la estructura será normalmente 2:1.

| **El área de retención de tormentas.** Depósito al final del recorrido de escorrentía que acumula temporalmente grandes volúmenes de agua. Se prioriza su integración en el paisaje y el aprovechamiento de espacios infrautilizados. Incorpora superficies vegetales o firmes permeables.

| **El estanque de retención.** Zona de almacenamiento con lámina de agua parcial permanente y con vegetación. La proporción largo-ancho estará entre 3:1 y 5:1. La profundidad mínima será de 1 m y la máxima de 2 m. Las pendientes laterales tendrán relación 3:1 para mantenimiento y seguridad.

| **La balsa de detención.** Superficie de almacenamiento que ralentizan el agua, favorece la infiltración gradual al terreno y permite la separación de partículas contaminantes arrastradas. Generalmente es una superficie seca que puede combinarse con usos recreativos urbanos. En climas húmedos están vegetadas.

En climas secos, pero con tormentas esporádicas, se utiliza material de escollera o piedras de gran porte. La pendiente será inferior a 1:4. Si el terreno lo permite, puede aumentarse la pendiente mediante tramos escalonados.

Es recomendable incorporar sistemas de pretratamiento que eliminen los sedimentos y partículas sólidas.

| **La banda filtrante.** Zona lineal vegetada con alta capacidad permeable, en la que el agua superficial puede ser temporalmente almacenada o transportada. Permite la circulación del agua a menor velocidad, actuando como primer filtro. La incorporación de una tubería dren perforada en su base aumenta su capacidad de evacuación.

Su diseño debe evitar que en periodos de tormenta se produzcan velocidades superiores a 1 m/s. El flujo de agua superficial,



Figura 39. Banda filtrante, balsa de detención, cuneta rellena y cuneta verde.

durante el periodo de tormenta, no debe superar la altura de la vegetación (10 centímetros habitualmente). La proporción de alto-ancho será 1:3 siempre que el terreno lo permita. El ancho mínimo de la base tendrá al menos 0,5 m.

| **El talud verde.** Banda vegetada en suave pendiente, diseñada para retener el agua de escorrentía y amortiguar su velocidad, y para favorecer procesos de drenaje del agua recibida. Es conveniente la utilización de especies autóctonas de bajo porte.

| **Los elementos de ralentización.** Modificación topográfica y/o incorporación de elementos puntuales en zonas de transporte de agua para ralentizar y dirigir el agua hacia zonas de mayor permeabilidad con bancales, desniveles, aterrazamientos..., que pueden incorporarse al diseño de los aparcamientos, las zonas de juegos o las zonas estanciales.

| **La cuneta rellena.** Cuneta rellena con cantos rodados o material de escollera de diferentes granulometrías que permite mantener la capacidad de transporte y drenaje, y mejora las condiciones de seguridad.

| **La cuneta verde.** Canal naturalizado para la recogida, transporte, ralentización e infiltración del agua de lluvia, integrado esté-

ticamente en el entorno, que contribuye y facilita el proceso de evapotranspiración y disminuye el efecto "isla de calor". El acabado superficial varía en función de la climatología del lugar y el tipo de vegetación empleada (plantas tapizantes autóctonas, vegetación de ribera, etc.).

Las recomendaciones para su diseño son: velocidades inferiores a 1 m/s, la altura del flujo de agua superficial en tormenta inferior a la altura de la vegetación (10 cm), la proporción alto-ancho es de 1:3 y ancho mínimo de base de 0,5 m.

| **El dren francés.** Franja de diferentes anchos rellena de material permeable que permite la filtración del agua de lluvia para su transporte o almacenamiento posterior.

Representa una alternativa a la instalación de barreras de seguridad en carreteras y autovías cuando el obstáculo a proteger es una cuneta y puede incorporar un tubo de drenaje poroso para mejorar la conducción.

| **La represa de detención temporal.** Área de ralentización en el interior de una zanja que permite amortiguar la velocidad de la escorrentía captada. Habitualmente está construida con materiales de medianas dimensiones, por el que puede pasar el agua de lluvia. Su utilización es aconsejable en zanjas de grandes longitudes.

| **La franja filtrante o el filtro vegetal.** Área vegetada para retener y tratar la escorrentía superficial, que requiere de grandes superficies. Se utiliza en los márgenes de la calzada como zona de entrada a la cuneta verde.

| **La zanja de infiltración.** Excavación lineal de poca profundidad, rellena con piedras o material de escollera de 40 a 60 mm de diámetro, para permitir el drenaje y la acumulación subsuperficial y disminuir la velocidad de escorrentía. El agua recibida puede ser infiltrada al terreno tanto desde su base como desde sus laterales.

Las recomendaciones para su diseño son: profundidad de entre 1 y 2 m, relleno de pie-

dras de diversa granulometría, incluyendo puntos de mantenimiento y control en caso de contar con tubos drenantes.

| **El pozo de infiltración.** Zona de captación del agua superficial para su almacenamiento e infiltración. Su integración en el medio urbano puede llevarse a cabo con rotondas, alcorques de infiltración, áreas verdes, etc.

Por seguridad es aconsejable rellenar la superficie captadora con grava o material de escollera.

La recomendación para su diseño es calcular su volumen o capacidad mediante la fórmula:

$$\text{Volumen (m}^3\text{)} = \text{área drenada (m}^2\text{)} \times \text{ratio de precipitaciones (mm/hora)/3.000.}$$

| **El depósito de infiltración.** Depósito para captar y almacenar el agua de escorrentía, aumentando la capacidad de retención e infiltración al terreno. Suele situarse en zonas verdes y cunetas, y está formado por sistemas compactos o por la acumulación de componentes modulares.

Sus dimensiones dependen tanto de la capacidad de infiltración del terreno como de la pluviometría y la envolvente del depósito se protege con una o varias capas de geotextil y una cama de arena en todo su perímetro.



Figura 40. Zanja y depósitos de infiltración.

1.7. Ejemplo representativo

Zona urbana de media densidad y en pendiente, con varias soluciones enfocadas a controlar:

- | La cantidad de agua recibida para prevenir la erosión por escorrentía e inundaciones.
- | La calidad del agua para poder reutilizarla en usos no potables y reducir los contaminantes.

Cantidad de agua

En los edificios se incorporan cubiertas y fachadas vegetales, con especies autóctonas de bajo consumo hídrico y riego.

A escala urbana se incorporan pavimentos permeables y vegetación. Al tratarse de un terreno en pendiente, las masas vegetales autóctonas de gran porte, en combinación con masas vegetales autóctonas tapizantes, se ubican en las zonas altas.

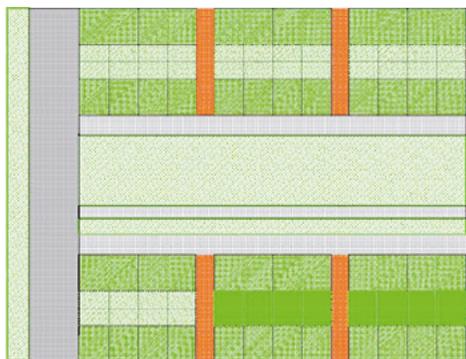


Figura 41. Ejemplo de planta de viviendas unifamiliares.

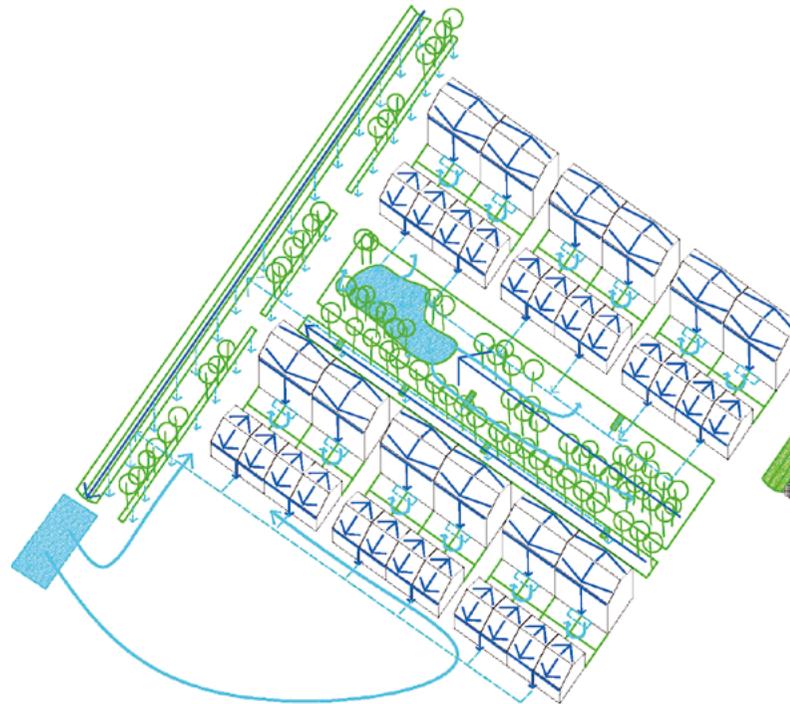


Figura 42. Recorrido del agua en una urbanización de viviendas unifamiliares.

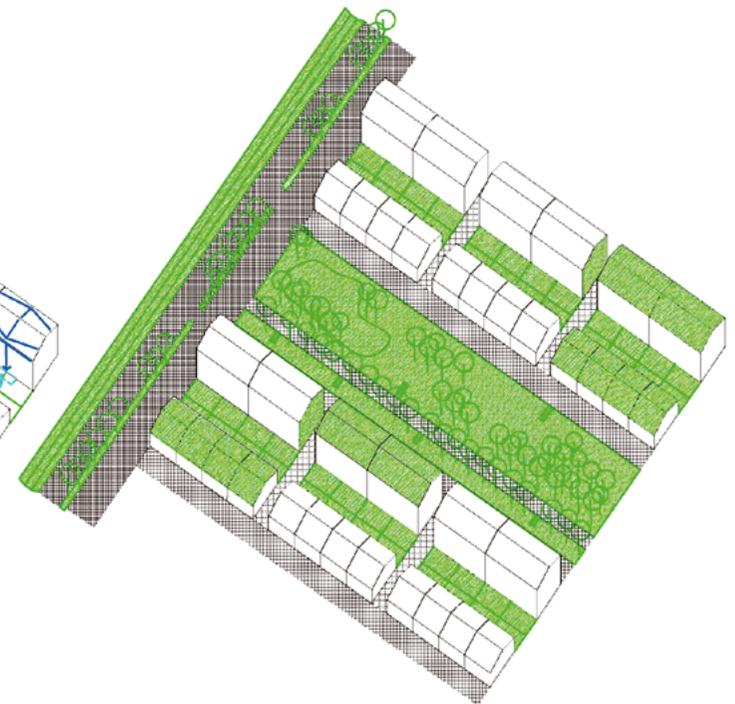
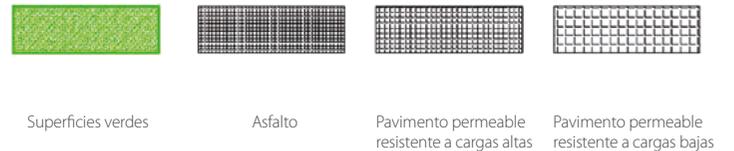


Figura 43. Tipos de superficies del agua.



En las zonas transitables se utilizan pavimentos permeables según su uso: tráfico rodado o peatonal. Para la captación superficial y subsuperficial se incluyen cunetas verdes, zonas de acumulación y modificaciones topográficas.

A nivel subsuperficial se incluye una red separativa de aguas pluviales a la que se conectan las captadas en cubiertas y en pozos de drenaje rellenos de grava. La evacuación del agua se jerarquiza: en primer lugar pasa por un estanque de retención, evacuando el exceso a una zanja filtrante perimetral en toda la cuenca urbana, y se conecta, para finalizar, con la red urbana de agua.

Calidad del agua

En las cubiertas de los edificios se incorporan filtros separadores de hojas y sedimentos. A escala urbana, la utilización de sistemas combinados de infiltración (terreno con grava de diferente granulometría) favorece la eliminación de partículas contaminantes arrastradas.

En los aparcamientos y los viales de vehículos a motor se incluyen separadores de hidrocarburos, balsas de evaporación y sistemas de biorremediación de metales pesados.

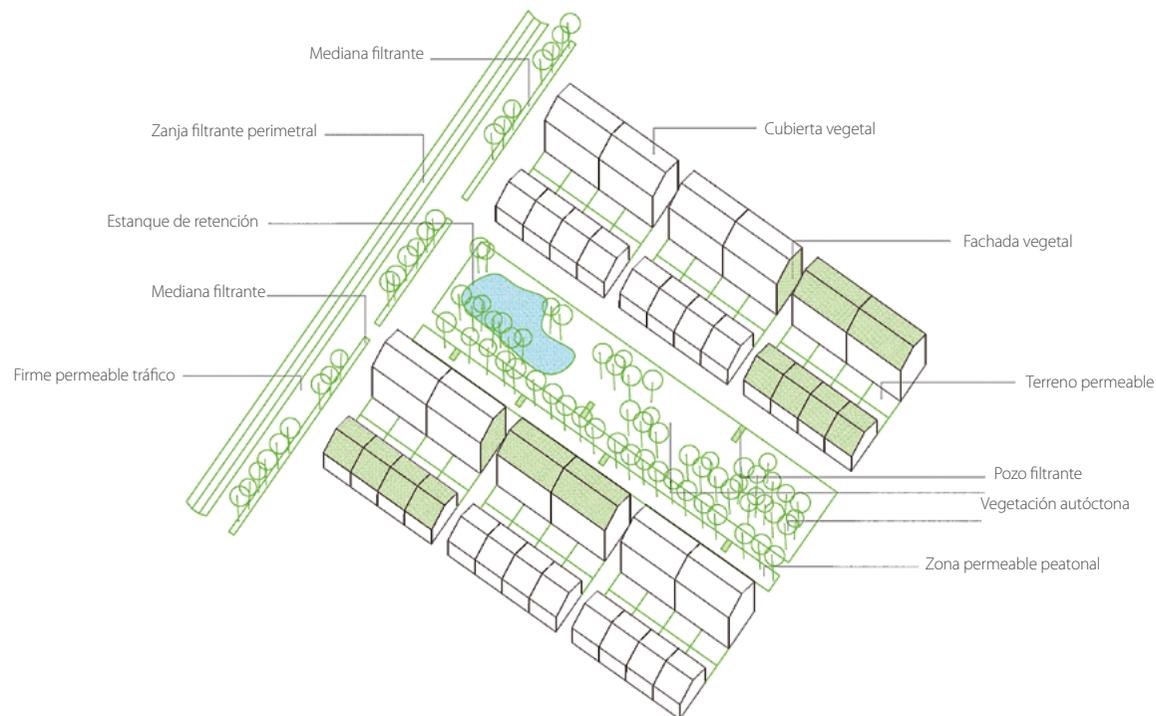


Figura 44. Esquema de distintas medidas preventivas en una urbanización tipo.

2. Almacenamiento de agua

La importancia que el agua tiene para la actividad humana es crucial. La demanda crece constantemente con la población y el desarrollo, y las previsiones en cuanto a las precipitaciones hablan de disminución en su periodicidad y concentración de la cantidad en cada episodio.

Parece por tanto recomendable no sólo racionalizar su consumo, sino también almacenar el máximo posible (en condiciones de calidad adecuada y respetando el ciclo natural) para su posterior utilización, y también como medida preventiva frente a la erosión, sequías e inundaciones.

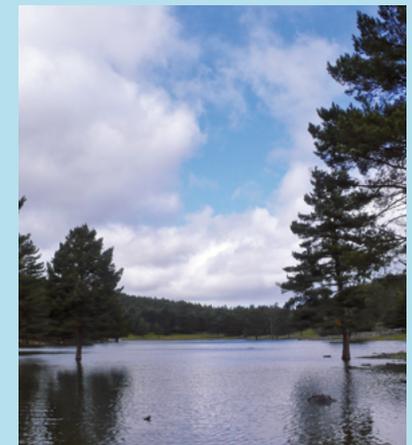


Figura 45. Almacenamiento de agua.

2.1. Problemática

Los principales problemas asociados al almacenamiento de agua son los siguientes:

| **La contaminación de acuíferos, fuentes y manantiales**, debido al uso excesivo de fertilizantes y pesticidas, las fugas de aguas residuales o fugas de combustibles, la ausencia de sistemas de filtración y depuración de aguas, la pérdida de vegetación y la intrusión de agua salina en el acuífero.

| **La desecación de humedales**, debido a la escasez de las precipitaciones, la modificación del curso del acuífero que alimenta al humedal, la disminución de la recarga del acuífero o su explotación intensiva.

| **La escasez de agua**, debido a la ausencia de infraestructuras de almacenamiento para el riego, la ganadería o la lucha contra incendios.

| **El mal uso del agua almacenada**, debido a la mala regulación del caudal.

| **Las inundaciones** provocadas por la falta de almacenamiento, de amortiguación de la escorrentía y el exceso de impermeabilización superficial.

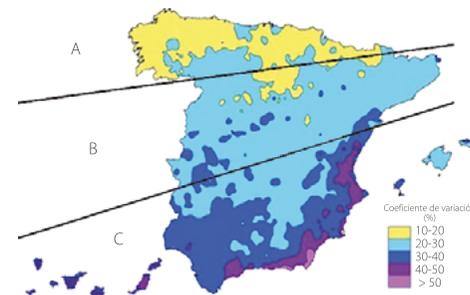
| **La exclusividad de usos** reduce el beneficio del uso compartido de sistemas de almacenamiento en aplicaciones agrícolas, ganaderas, medioambientales o de lucha contra incendios.

| **La falta de adaptación a la zona climatológica**, utilizando soluciones estandarizadas.

| **La desnaturalización** que provocan los elementos medioambientalmente no integrados.

Las diferentes formas de almacenar agua permiten obtener diferentes beneficios, atendiendo a la clasificación climatológica de España.

| | OBJETIVO | TIPOLOGÍA | | | PRECIPITACIONES | | |
|---------------------|------------------------------------------------|-----------|----------|---------|-----------------|--------|--------|
| | | Balsa | Depósito | Humedal | Zona A | Zona B | Zona C |
| Terreno permeable | Amortiguación de avenidas fluviales | █ | █ | █ | █ | █ | █ |
| | Aprovechamiento del agua de escorrentía | █ | █ | █ | █ | █ | █ |
| | Aprovechamiento del agua de desagües naturales | █ | █ | █ | █ | █ | █ |
| | Calidad paisajista | █ | █ | █ | █ | █ | █ |
| | Regulación del caudal | █ | █ | █ | █ | █ | █ |
| | Filtración en el terreno | █ | █ | █ | █ | █ | █ |
| | Recarga de acuíferos | █ | █ | █ | █ | █ | █ |
| Terreno impermeable | Depuración del agua | █ | █ | █ | █ | █ | █ |
| | Amortiguación de avenidas fluviales | █ | █ | █ | █ | █ | █ |
| | Aprovechamiento del agua de escorrentía | █ | █ | █ | █ | █ | █ |
| | Aprovechamiento del agua de desagües naturales | █ | █ | █ | █ | █ | █ |
| | Calidad paisajista | █ | █ | █ | █ | █ | █ |
| | Recarga de acuíferos | █ | █ | █ | █ | █ | █ |
| | Regulación del caudal | █ | █ | █ | █ | █ | █ |
| Depuración del agua | █ | █ | █ | █ | █ | █ | |



| | Precipitaciones (mm) | | | |
|--------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| | Precipitación media (mensual) | Precipitación media (anual) | Precipitación máxima | Precipitación mínima |
| Zona A | 79,14 | 949,72 | 357,86 | 0,50 |
| Zona B | 37,47 | 449,58 | 221,89 | 0,00 |
| Zona C | 32,92 | 395,05 | 304,64 | 0,00 |

Figura 46. División geográfica según la variación de la precipitación.



Figura 47. Balsa de regadío en Ciudatella.



Figura 48. Balsa de regadío en Es Mercadal.



Figura 49. Balsa de regadío en Palma de Mallorca.

2.2. Tipología

Diferenciamos tres grupos principales de almacenamiento:

Balsa

Obra hidráulica consistente en una estructura artificial destinada al almacenamiento de agua situada fuera de un cauce. Es una opción económica de almacenamiento. Almacenan y regulan, pero no captan agua, por lo que no tienen avenidas. Su geometría se define por la morfología del terreno y el material impermeabilizante que se vaya a utilizar, y suelen ser troncopiramidales inversas.

Los elementos habituales de una balsa son: capa soporte, impermeabilizante, capa de protección, drenaje, muro perimetral, entrada y salida del agua, y aliviaderos.

Se clasifican según la siguiente tabla:

| Balsa | | |
|---------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Terreno permeable | Según impermeabilización | <ul style="list-style-type: none"> Sin impermeabilizar Hormigón Láminas sintéticas Láminas asfálticas Tierra impermeable (arcilla) Arcilla procedente de la excavación |
| | Según cubrición | <ul style="list-style-type: none"> Lámina sintética flotante Lámina sintética atirantada |
| Terreno impermeable | Según uso | <ul style="list-style-type: none"> Riego agrícola Bebadero para ganado Producción de pesca Abastecimiento para agua potable Medioambiental Abastecimiento para lucha contra incendios |
| | Según función | <ul style="list-style-type: none"> Almacenamiento Regulación de caudal Aprovechamiento del agua de escorrentía Aprovechamiento del agua de desagües naturales Uso recreativo Amortiguación de avenidas fluviales Recarga y descarga de acuíferos Filtración y depuración de aguas Zonas de reproducción de especies Calidad paisajista |

Depósito

Se clasifican en:

| | | Depósito |
|------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Según localización | Enterrado | Abierto Cerrado |
| | Apoyado en el suelo | Abierto Cerrado |
| | Aéreo | Abierto Cerrado |
| Según material | Albañilería (1,00-250,00 m ³) | Ladrillo revestido e impermeabilizado Mampostería de piedra revestida e impermeabilizada |
| | Hormigón (20,00-37.000,00 m ³) | Armado e impermeabilizado Prefabricado e impermeabilizado |
| | Sintético (0,050-400,00 m ³) | Polietileno de alta densidad (PEAD) |
| | | Poliéster reforzado de fibra de vidrio (PRFV) |
| | | Polipropileno (PP) PVC Flexible de tejido poliéster con PVC |
| Metálico (5,00-5.000,00 m ³) | Chapa ondulada Chapa lisa | |
| Según uso | | Abastecimiento para protección contra incendios Abastecimiento para agua potable Riego agrícola Bebedero para ganado Uso recreativo Medioambiental |
| Según función | | Almacenamiento de agua pluvial Almacenamiento de agua potable Regulación de caudal Reserva de agua Filtración y depuración de aguas Recarga y descarga de acuíferos Calidad paisajista |



Figura 50. Aljibe en Tegui, Lanzarote.



Figura 51. Depósito prefabricado de la Planta de Prefabricados de Tragsa.



Figura 52. Depósito modular enterrado.



Figura 53. Delta del Ebro.



Figura 54. Marisma de Santoña.



Figura 55. Vista aérea de humedal.

Humedal

Zona húmeda donde el suelo o sustrato está, al menos periódicamente, cubierto de agua. La saturación de agua es el factor dominante y determina la naturaleza del desarrollo del suelo y del tipo de comunidades de plantas y de animales que viven en ella.

También se consideran incluidas aquellas formaciones en las que el agua se mantiene lo suficientemente cerca de la superficie como para constituir una anomalía paisajística y albergar formaciones vegetales freatófilas (criptohumedales).

Se clasifican en:

| | | Humedal | |
|------------|--------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Natural | Según localización | Marino-costero | Laguna costera Salina Marisma Marjal Estuario (manglar) |
| | | Continental | Delta Criptohumedal Charca Laguna Poza Pantano (estero, ciénaga, turbera) |
| Artificial | | Según tipología | Bosque de ribera Fuente y manantial Estanque (alberca) Canal Arrozal Salina Fuente y manantial Excavación inundada (cantera, abrevadero...) Tierra agrícola inundada |
| | | Según uso | Abastecimiento para protección contra incendios Riego agrícola Bebadero para ganado Medioambiental |
| | | Según función | Amortiguación de avenidas fluviales (bosque de ribera, meandro abandonado...) Amortiguación de temporales marítimos Recarga y descarga de acuíferos (fuente, manantial...) Zona de reproducción de especies (riqueza biológica) Filtración y depuración de aguas (filtro verde artificial, bosque de ribera, marjal...) |

2.3. Elementos configuradores

Balsa

El diseño geométrico de la balsa debe cumplir los objetivos de funcionalidad y seguridad, siendo las soluciones más sencillas las más funcionales. La definición del contorno de coronación suele realizarse con rectas y circunferencias de fácil replanteo y la solución de capacidad máxima se acercará siempre al círculo.

Los elementos configuradores típicos de una balsa son los siguientes:

| **El talud interior y la solera.** Impermeabilizado mediante geomembrana, con revestimiento geotextil que acondiciona y mejora su resistencia. La inclinación será la mayor posible, estando limitada por las características de rozamiento interno y cohesión de los materiales.

La inclinación recomendada debe tener una proporción 2:1 o 2,5:1 (relación horizontal/vertical). Con longitud de talud superior a 30 metros se disponen bermas horizontales de anchura 2,5 metros para aumentar la se-

guridad, facilitar el drenaje de las escorrentías superficiales y servir de base a los anclajes de la lámina impermeable.

| **La entrada de agua.** Generalmente se sitúa en la coronación con una arqueta de disipación de energía.

| **La toma y desagüe de fondo.** Se ubican en el punto de cota inferior en una arqueta con rejilla. Se dimensionan para permitir una evacuación del agua de la balsa en dos o tres días al cauce más próximo. Las conducciones discurren bajo los terraplenes por galería visitables y disponen de válvulas de regulación en sus extremos.

En balsas de reducidas dimensiones, la galería visitable puede sustituirse por una conducción de diámetro suficiente para la evacuación.

| **El aliviadero.** Los caudales sobrantes se restituirán de la manera más sencilla, segura y cómoda a algún cauce próximo o por infiltración al terreno.

| **El drenaje.** En balsas revestidas es recomendable disponer de una red de drenaje que canalice las pérdidas, formada por zanjas situadas al pie del talud y en el fondo de la balsa. La red de drenaje se configura con forma de espina de pez y las zanjas se rellenan con

grava envuelta en geotextil. La evacuación se realiza a través de la galería de fondo.

Depósito

Los elementos que configuran un depósito varían en función de su tipología:

| **Depósito de fábrica.** De ladrillo o mampostería se construye excavado o semienterrado sobre una losa de hormigón armado. Los muros se refuerzan con pilares y se revisten con enfoscado y tratamiento impermeabilizante.

| **Depósito de hormigón armado.** Enterrado o de superficie, cubierto o abierto y formado por una losa de cimentación, el muro, el forjado o la losa de cubrición y la impermeabilización interior.

| **Depósito de hormigón prefabricado.** Compuesto por paneles prefabricados de hormigón sobre una zapata de cimentación y una losa armada en el suelo, con juntas verticales selladas y cubierto con un forjado o una losa de cubrición.

| **Depósito sintético.** Formado por elementos compactos enterrados o en superficie, estos últimos con tratamiento frente a rayos ultravioletas y agentes atmosféricos. Construido en excavación, consta de cama de arena o

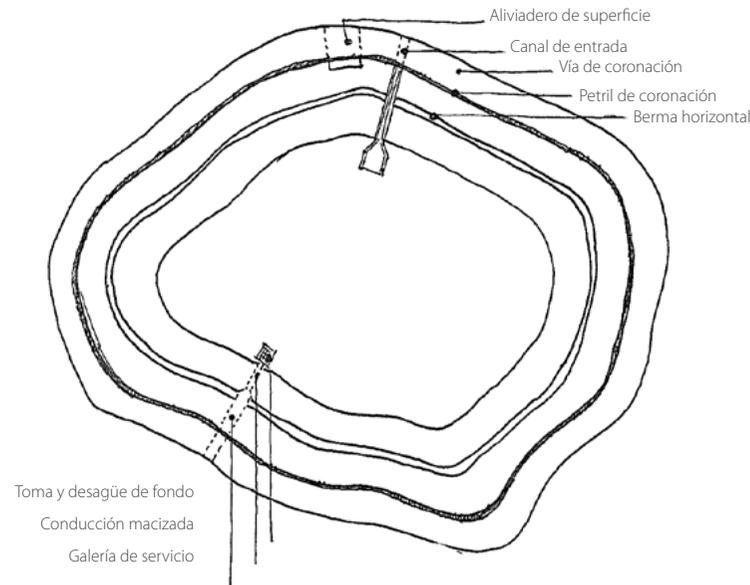


Figura 56. Elementos de una balsa.

losa de cimentación –según el tipo de terreno soporte– y relleno de arena en su perímetro contra terreno.

Si circulan sobre él vehículos rodados, se construirá una losa de hormigón para el reparto de cargas. Si el suelo no es estable, se construirán muros de contención. Si el nivel freático es elevado, la losa y los muros de hormigón armado irán anclados. En terrenos con pendiente mayor del 5 % el depósito irá semienterrado e incluirá drenaje de aguas pluviales en la parte superior.

| Depósito sintético de infiltración o almacenamiento con celdas de polipropileno.

Permiten una mejor adaptación al terreno y constan de excavación con el talud según el terreno, una lámina impermeabilizante si son de almacenamiento y una lámina geotextil envolviendo las celdas de polipropileno. Sobre el relleno drenante se coloca otra lámina de geotextil y relleno de tierra, permitiendo que el agua se infiltre al terreno.

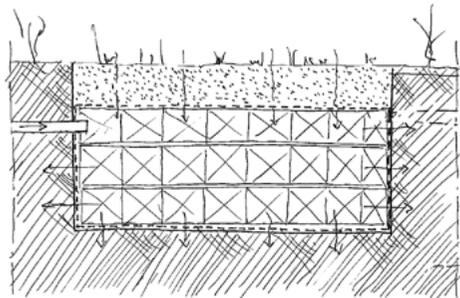


Figura 57. Esquema de depósito sintético de infiltración modular.

Pueden disponer de un pozo de control de descarga en la salida.

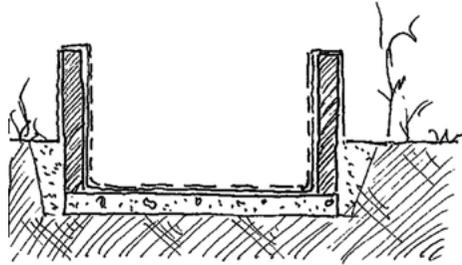


Figura 58. Esquema de depósito de fábrica.

| Depósito de infiltración o almacenamiento con neumático reciclado triturado o entero.

Se construye mediante excavación con un talud adecuado al terreno, una lámina impermeabilizante si es para almacenamiento y una lámina de geotextil que envuelve al material reciclado. El relleno interior es de neumático reciclado y la cubierta superior de tierra vegetal. Consta también de dos pozos perforados de entrada y salida comunicados por una tubería perforada.

| Depósito metálico. Ubicado en superficie sobre una base de hormigón armado en la que se instalan los paneles de acero ensamblados con tornillos y juntas selladas.

El acabado interior puede ser una impermeabilización con lámina sintética sobre cama de arena o mediante revestimiento impermeabilizante de pintura de resina sobre losa de hormigón.

El depósito dispone de tuberías y válvulas de llenado y vaciado.

Humedal artificial

| **Estanque.** Consta de excavación en tierra, contención con ladrillo, mampostería u hormigón y vaso impermeabilizado. Incorpora toma de alimentación y salida de desagüe y vaciado. Puede incorporar una protección de la lámina impermeabilizante y una rampa lateral de seguridad y mantenimiento. La profundidad garantizará la seguridad de personas y animales.

| **Canal.** Es una construcción adaptada al terreno con una pendiente suave descendente y con cambios de dirección de radio moderado. El canal se realiza en excavación con fábrica de ladrillo, mampostería, hormigón o directamente impermeabilizando el terreno compactado.

| **Fuente y manantial.** Perforación en el terreno que permite al agua emerger a la superficie por sobrepresión.

2.4. Almacenamiento y depuración terciaria

El tratamiento terciario de aguas negras, residuales o contaminadas se puede realizar mediante técnicas de depuración natural, a través de plantaciones de especies acuáticas emergentes, sumergidas o flotantes. Estos ecosistemas tienen asociadas las bacterias capaces de realizar la descomposición de la materia orgánica, presentes en los sistemas biológicos de depuración tradicional. La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilitando la filtración y la absorción de los constituyentes del agua residual, y permitiendo la transferencia de oxígeno de la columna de agua.

Esta depuración natural puede ser sobre el terreno (filtro verde, infiltración, escorrentía superficial o lechos de arena o turba) o acuática (lagunaje, humedales artificiales, fitorremediación o cultivos acuáticos). Algunas de las técnicas para conseguir una depuración terciaria son:

El filtro verde

Es un caudal controlado de agua residual sobre la superficie del terreno de una plantación de masa forestal o de un cultivo específico. El proceso de depuración consiste en la eliminación de:

- | Los sólidos en suspensión por filtración a través del conjunto que forma el substrato con los rizomas y las raíces.

- | La materia orgánica a través de los microorganismos del sistema forestal.
- | El nitrógeno por reacciones bioquímicas de desnitrificación y mineralización.
- | El fósforo por parte de las plantas.
- | El azufre, bajo condiciones aeróbicas.
- | Otros iones inorgánicos.
- | Los microorganismos patógenos.

Para el correcto funcionamiento de estos sistemas, el terreno debe tener una permeabilidad y granulometría adecuadas, siendo los más idóneos los terrenos franco-arcillosos y franco-arenosos. El nivel piezométrico debe situarse por encima de 1,5 m de la superficie y la extensión mínima se sitúa en el orden de una hectárea cada 250 habitantes, aunque esta proporción podrá variar según la climatología.

Con el filtro verde se pueden alcanzar reducciones de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) del 90 %, reducciones de los sólidos en suspensión del 95 %, reducción del fósforo y de los compuestos nitrogenados del 80 % y la eliminación de los microorganismos patógenos. Todo ello sin producción de fangos y sin consumos energéticos debidos a equipos mecánicos.

Además de ser válido como tratamiento terciario, puede generar producción maderera, tiene un impacto visual positivo y permite reutilizar el agua tratada¹.

Como desventaja, el filtro verde necesita una gran extensión de terreno llano y tiene una capacidad de filtración limitada en volumen y estacionalidad. Por problemas de contaminación, no debe haber presencia de acuíferos próximos, y en climas fríos se produce una parada en el crecimiento de la vegetación que disminuye o paraliza el rendimiento del sistema y el proceso de evapotranspiración.

La infiltración rápida

Consiste en la aplicación controlada del agua residual sobre una balsa superficial construida sobre un suelo de permeabilidad media o alta.

El agua se aplica al terreno en tasas elevadas por extensión en lagunas, aspersion o inundación, y de forma cíclica para permitir la regeneración aerobia. No requiere la existencia de vegetación sobre el terreno.

La escorrentía superficial

Consiste en la escorrentía del agua residual forzada mediante el riego por circulación superficial en láminas sobre un suelo previamente acondicionado en pendiente y con vegetación arbórea, alternando periodos de riego y de secado.

El lecho de arena o turba

Es un lecho de material granular, de tamaño de grano relativamente uniforme, que se emplea como sistema de afino de aguas tratadas previamente.

El lagunaje

Almacenamiento durante un tiempo variable en función de la carga contaminante aplicada y de las condiciones climáticas. La materia orgánica resulta degradada mediante la actividad de los microorganismos presentes en el medio acuático.

El humedad artificial

Es un terreno inundado con aproximadamente 60 cm de profundidad donde el agua fluye continuamente. La vegetación proporciona superficies adecuadas para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la absorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia del oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas.

Suele disponer de una base impermeable sobre la que se deposita un lecho de grava u otro suelo que permita el desarrollo de las plantas.

¹ La reutilización de aguas en España se rige por el Real Decreto 1620/2007 de 7 de diciembre y por el RD 509/1996 de 15 de marzo, donde aparecen los valores máximos admisibles de contaminantes.

El humedal artificial puede ser:

De flujo libre. Canal paralelo sobre un suelo impermeable, con vegetación emergente y con niveles de agua inferiores a 60 cm. El tratamiento se produce durante el flujo del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación.

De flujo subsuperficial. Canal o zanja rellena de material granular donde el nivel de agua se mantiene por debajo de la superficie granular. El sistema genera altas tasas de microorganismos y requiere menos super-

ficie que el humedal artificial de flujo libre, evitando además la presencia de mosquitos. Es un tratamiento terciario apto para riego agrícola por la eliminación de los sólidos y de la materia orgánica que pueden obstruir los sistemas de riego por goteo, y por el contenido de nitrógeno y fósforo del efluente resultante.

La fitorremediación

Consiste en la absorción de sustancias contaminantes a través de especies vegetales cuyos tipos principales recogemos en la siguiente tabla.

El cultivo acuático

Es un sistema de plantas acuáticas flotantes con profundidades que van desde los 50 cm hasta los 180 cm.

La planta actúa como bomba extractora de bajo costo para depurar el agua contaminada. Permite descontaminar superficies grandes o finalizar la descontaminación de áreas restringidas, en periodos prolongados, y se pueden alcanzar rendimientos de depuración adecuados sin consumo de energía y con bajo mantenimiento.

| Tipo | Proceso involucrado | Contaminación tratada |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fitoextracción | Las plantas concentran metales en la parte aérea principalmente. | Cd ₂₊ , Co ₂₊ , Cr ₂₊ , Ni ₂₊ , Hg ₂₊ , Pb ₂₊ , Se ₂₊ , Zn ₂₊ . |
| Rizofiltración | Las raíces de las plantas absorben, precipitan y concentran metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados. | Cd ₂₊ , Co ₂₊ , Cr ₂₊ , Ni ₂₊ , Hg ₂₊ , Pb ₂₊ , Se ₂₊ , Zn ₂₊ . |
| Fitoestabilización | Plantas tolerantes a metales. Se usan para reducir la movilidad de los mismos y evitar el pasaje a capas subterráneas o a la atmósfera. Contribuyen a estabilizar el suelo. | Lagunas de desecho de yacimientos mineros. Propuesto para fenólicos y compuestos clorados. |
| Fitovolatilización | Las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración. | Hg ₂₊ , Se ₂₊ y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano). |
| Fitodegradación | Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos no tóxicos. | Explosivos (TNT, DNT, RDX, nitrobenzeno, ácido pícrico, nitrotolueno, nitrometano, nitroetano). Antrazina, solventes clorados, bromuro de metilo, tetrabromoetano, tetracloroetano, DDT, pesticidas fosfatados, bifenolespoliclorinados, fenoles y nitritos. |
| Fitoestimulación | Exudados radiculares promueven el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos). | Hidrocarburos poliaromáticos, benceno, tolueno, etilbenceno, xileno, hidrocarburos del petróleo, antrazina, ataclor, bifenilospoliclorados, otros compuestos orgánicos. |

Listado de plantas y capacidad de depuración

Planta leñosa

Especie arbustiva

- Mirto (*Myrtus communis*)
- Adelfa (*Nerium oleander*)
- Tamarisco (*Tamarix sp.*)
- Terebinto (*Pistacia terebinthus*)
- Sauzgatillo (*Vitex agnus-castus*)
- Lentisco (*Pistacia lentiscus*)
- Retama de olor (*Spartium junceum*)
- Rhododendro (*Rhododendron spp.*)
- Hibisco (*Hibiscus rosa-sinensis*)
- Aralia (*Fatsia japonica*)
- Vinca (*Catharanthus roseus*)
- Hiedra (*Hedera helix*)

Especie arbórea

- Higuera (*Ficus carica*)
- Ciprés (*Cupressus sempervirens*)
- Álamo blanco (*Populus alba*)
- Álamo negro (*Populus nigra*)
- Sauce (*Salix babylonica*)
- Aliso (*Alnus glutinosa*)
- Olmo (*Ulmus minor*)
- Eucalipto (*Eucalyptus ficifolia*)
- Enebro (*Juniperus communis*)
- Árbol de los dioses (*Ailanthus altissima*)
- Árbol de las tulipas (*Liriodendron tulipifera*)
- Magnolia (*Magnolia grandifolia*)
- Ciruelo rojo (*Prunus cerasifera*)
- Serbal (*Sorbus spp.*)
- Camelia (*Camellia spp.*)
- Pino carrasco (*Pinus halepensis*)

| | Características | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|---------|---------|-----------------|-------|--------------------|------------------------|----------|------------|--------------|--------------------------------------|----------|---------|--------|-----------------|------------------------|--|
| | Hoja caduca / Planta anual | Hoja perenne / Planta vivaz | Tolerancia al agua residual | Buen crecimiento | Flujo de oxígeno a zona sumergida | Muy resistentes a la contaminación | Macronutrientes | | | Metales pesados | Algas | Iones radioactivos | Desechos explosivos | Nitratos | Herbicidas | Petróleo | Eliminación de | | | | | | |
| | | | | | | | Nitrógeno | Fósforo | Potasio | | | | | | | | Contaminantes suspendidos en el aire | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | Formaldehído | Benceno | Amoníaco | Acetona | Xileno | Tricloroetileno | Monóxido de carbono | |
| Mirto (<i>Myrtus communis</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Adelfa (<i>Nerium oleander</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Tamarisco (<i>Tamarix sp.</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Terebinto (<i>Pistacia terebinthus</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sauzgatillo (<i>Vitex agnus-castus</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Lentisco (<i>Pistacia lentiscus</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Retama de olor (<i>Spartium junceum</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rhododendro (<i>Rhododendron spp.</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Hibisco (<i>Hibiscus rosa-sinensis</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Aralia (<i>Fatsia japonica</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Vinca (<i>Catharanthus roseus</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Hiedra (<i>Hedera helix</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Higuera (<i>Ficus carica</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ciprés (<i>Cupressus sempervirens</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Álamo blanco (<i>Populus alba</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Álamo negro (<i>Populus nigra</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sauce (<i>Salix babylonica</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Aliso (<i>Alnus glutinosa</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Olmo (<i>Ulmus minor</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Eucalipto (<i>Eucalyptus ficifolia</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Enebro (<i>Juniperus communis</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Árbol de los dioses (<i>Ailanthus altissima</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Árbol de las tulipas (<i>Liriodendron tulipifera</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Magnolia (<i>Magnolia grandifolia</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ciruelo rojo (<i>Prunus cerasifera</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Serbal (<i>Sorbus spp.</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Camelia (<i>Camellia spp.</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pino carrasco (<i>Pinus halepensis</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Las especies caducifolias son resistentes y absorben como mínimo un tercio de los agentes contaminantes atmosféricos comunes.

Características

Eliminación de

Planta acuática

Macronutrientes

Contaminantes suspendidos en el aire

Emergente

| | Hoja caduca / Planta anual | Hoja perenne / Planta vivaz | Tolerancia al agua residual | Buen crecimiento | Flujo de oxígeno a zona sumergida | Muy resistentes a la contaminación | Nitrógeno | Fósforo | Potasio | Metales pesados | Algas | Iones radioactivos | Desechos explosivos | Nitratos | Herbicidas | Petróleo | Formaldehído | Benceno | Amoníaco | Acetona | Xileno | Tricloroetileno | Monóxido de carbono | |
|---------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------|---------|---------|-----------------|-------|--------------------|------------------------|----------|------------|----------|--------------|---------|----------|---------|--------|-----------------|------------------------|--|
| Espadaña (<i>Typha latifolia</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Carrizo (<i>Phragmites australis</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Caña de indias (<i>Canna sp.</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Céspedribereño (<i>Eleocharis sp.</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ñamera (<i>Alocasia sp.</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Piragüita (<i>Cyperus alternifolius</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Junco (<i>Juncus sp.</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Junco de laguna (<i>Scirpus lacustris</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Castañuela (<i>Scirpus maritimus</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Carex (<i>Carex sp.</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Lirio amarillo (<i>Iris pseudacorus</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Lechuga de agua (<i>Pistia stratiotes</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Hierba del maná (<i>Glyceria fluitans</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cálamo acuático (<i>Acorus calamus</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Aro (<i>Arum italicum</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Calta (<i>Caltha palustris</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Papiro (<i>Cyperus papyrus</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Houtuinia (<i>Houttuynia cordata</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Lirio japonés (<i>Iris laevigata</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Lirio (<i>Iris sibirica</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Aro de agua (<i>Lysichiton americanus</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pontederia (<i>Pontederia cordata</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Oreja de elefante (<i>Xanthosoma violaceum</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cala blanca (<i>Zantedeschia aethiopica</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Características

Eliminación de

Planta acuática

| | Hoja caduca / Planta anual | Hoja perenne / Planta vivaz | Tolerancia al agua residual | Buen crecimiento | Flujo de oxígeno a zona sumergida | Muy resistentes a la contaminación | Macronutrientes | | | | | | | | | | Contaminantes suspendidos en el aire | | | | | | |
|--|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|---------|---------|-----------------|-------|--------------------|------------------------|----------|------------|----------|--------------------------------------|---------|----------|---------|--------|-----------------|------------------------|
| | | | | | | | Nitrógeno | Fósforo | Potasio | Metales pesados | Algas | Iones radioactivos | Desechos explosivos | Nitratos | Herbicidas | Petróleo | Formaldehído | Benceno | Amoniaco | Acetona | Xileno | Tricloroetileno | Monóxido de carbono |

Planta sumergida

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Yana (<i>Elodea</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ceratofila (<i>Ceratophyllum</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Espiga de agua (<i>Potamogeton</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Estrella de agua (<i>Callitriche palustris</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Filigrana menor (<i>Myriophyllum verticillatum</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Vallisneria (<i>Vallisneria spp</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ranúnculo acuático (<i>Ranunculus aquatilis</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Elodia (<i>Elodea canadensis</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Planta flotante

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Nenúfar (<i>Nuphar</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Jacinto de agua (<i>Eichhornia crassipes</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Lenteja de agua (<i>Lemna sp</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Flor de agua (<i>Spirodela polyrhiza</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Acordeón de agua (<i>Salvinia minima</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mordisco de rana (<i>Hydrocharis morsusraeanae</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pita de agua (<i>Stratiotes aloides</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Musgo

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Musgo del pantano (<i>Sphagnum</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Scorpidium (<i>Scorpidium</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Musgo capilar (<i>Polytrichum</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Helecho juncal (<i>Isoetes velatum</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Hierba de la plata (<i>Equisetum bogotense</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Características

| Planta metalofita | Eliminación de | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------|---------|---------|-----------------|-------|--------------------|------------------------|----------|------------|----------|--------------|---------|----------|---------|--------|-----------------|------------------------|
| | Macronutrientes | | | Contaminantes suspendidos en el aire | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Metalofita | Hoja caduca / Planta anual | Hoja perenne / Planta vivaz | Tolerancia al agua residual | Buen crecimiento | Flujo de oxígeno a zona sumergida | Muy resistentes a la contaminación | Nitrógeno | Fósforo | Potasio | Metales pesados | Algas | Iones radioactivos | Desechos explosivos | Nitratos | Herbicidas | Petróleo | Formaldehído | Benceno | Amoníaco | Acetona | Xileno | Tricloroetileno | Monóxido de carbono |
| <i>Thlaspi caerulescens</i> | | ■ | | | | | | | | Zn, Cd | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Thlaspi calaminare</i> | | | | | | | | | | Zn | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Cardaminopsis halleri</i> | | ■ | | | | | | | | Zn | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Viola calaminaria</i> | | ■ | | | | | | | | Zn | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Haumaniastrum robertii</i> | | | | | | | | | | Co | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Haumaniastrum katangense</i> | | | | | | | | | | Cu, Zn | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Aeollanthus biformifolius</i> | | | | | | | | | | Cu | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Becium homblei</i> | ■ | | | | | | | | | Cu | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Phyllanthus serpentinus</i> | | | | | | | | | | Ni | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Astragalus racemosus</i> | | | | | | | | | | Se | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Alyxia rubricaulis</i> | | | | | | | | | | Mn | | | | | | | | | | | | | |
| Hierba de la virgen (<i>Tuecrium rotundifolium</i>) | | ■ | | | | | | | | Pb | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Macadamia neurophylla</i> | | | | | | | | | | Mn | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Alyssum sp.</i> | ■ | | | | | | | | | Ni | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Berkheya coddii</i> | | | | | | | | | | Ni | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Astragalus pattersoni</i> | | | | | | | | | | Se | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Iberis intermedia</i> | | | | | | | | | | Tl | | | | | | | | | | | | | |
| Melica transilvania (<i>Melica transsilvanica</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bromo inerte (<i>Bromus inermis</i>) | | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Elymus hispidus</i> | | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Vulneraria (<i>Anthyllis vulneraria</i>) | | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Gordolobo (<i>Verbascum thapsus</i>) | | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Geranio (<i>Pelargonium</i>) | | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Acedera (<i>Rumex acetosa</i>) | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Helecho (<i>Pteris vittata</i>) | ■ | | | | | | | | | As | | | | | | | | | | | | | |
| Pasto bermuda (<i>Cynodon dactylon</i>) | | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ataco (<i>Amaranthus hybridus</i>) | ■ | | | | | | | | | Pb, Zn | | | | | | | | | | | | | |

■ Plantas hiperacumuladoras: las especies perennifolias absorben nutrientes durante un periodo más prolongado.

Características

Eliminación de

Planta metalofita

Macronutrientes

Contaminantes suspendidos en el aire

Metalofita

- Areca (*Chrysalidocarpus lutescens*)
- Drácena marginata (*Dracaena marginata*)
- Helecho rizado (*Nephrolepis exaltata*)
- Poto (*Epipremnum aureum*)
- Filodendro (*Philodendron scandens*)
- Aguileña (*Aquilegia vulgaris*)
- Flox (*Phlox drummondii*)
- Prímula (*Primula obconica*)
- Campanilla dálmata (*Campanula muralis*)
- Petunia (*Petunia hybrida*)

| | Hoja caduca / Planta anual | Hoja perenne / Planta vivaz | Tolerancia al agua residual | Buen crecimiento | Flujo de oxígeno a zona sumergida | Muy resistentes a la contaminación | Nitrógeno | Fósforo | Potasio | Metales pesados | Algas | Iones radioactivos | Desechos explosivos | Nitratos | Herbicidas | Petróleo | Formaldehído | Benceno | Amoniaco | Acetona | Xileno | Tricloroetileno | Monóxido de carbono | |
|-------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------|---------|---------|-----------------|-------|--------------------|------------------------|----------|------------|----------|--------------|---------|----------|---------|--------|-----------------|------------------------|--|
| Areca (<i>Chrysalidocarpus lutescens</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Drácena marginata (<i>Dracaena marginata</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Helecho rizado (<i>Nephrolepis exaltata</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Poto (<i>Epipremnum aureum</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Filodendro (<i>Philodendron scandens</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Aguileña (<i>Aquilegia vulgaris</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Flox (<i>Phlox drummondii</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Prímula (<i>Primula obconica</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Campanilla dálmata (<i>Campanula muralis</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Petunia (<i>Petunia hybrida</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Hongo saprófito

- Agaricus macrosporus*
- Coprinus comatus*
- Lepista nuda*
- Boletus pinophilus*

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <i>Agaricus macrosporus</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Coprinus comatus</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Lepista nuda</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Boletus pinophilus</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

2.5. Ejemplo representativo

Se analiza una rotonda de 30 m de diámetro, en zona periurbana, donde confluyen varios viales y se plantea un humedal artificial para almacenamiento, infiltración y depuración de las aguas de escorrentía superficial de los viales y del entorno.

El diseño de la rotonda debe contar con una buena capacidad de almacenamiento de

agua, seguridad para los usuarios y diseño paisajístico. El objetivo es conseguir una zona de almacenamiento temporal dentro del espacio urbano con vegetación autóctona que permita el tratamiento del agua recogida en el entorno de la rotonda.

Con este diseño el espacio habitualmente residual gana funcionalidad y estética, convir-

tiéndose en un foco de mejora medioambiental urbano. El esquema de rotonda propuesto incorpora vegetación, dos zonas de almacenamiento de agua diferenciadas para mejorar el tratamiento de contaminantes, la recogida de agua del entorno por medio de conductos hasta las zonas de almacenamiento, y el desagüe de excedentes a la zona forestal colindante con zanjas de infiltración.

Criterios de construcción

Los criterios de construcción para esta rotonda con almacenamiento son:

- La excavación de zona de almacenamiento tendrá una profundidad inferior a los 150 cm y la nivelación del fondo llevará una ligera inclinación para el drenaje del sistema.

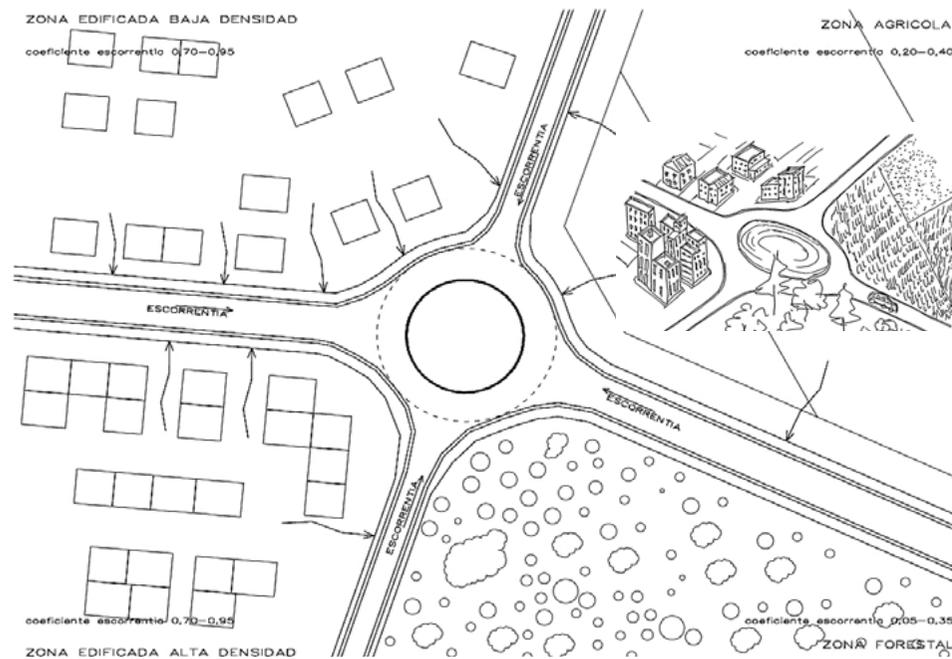


Figura 59. Esquema de situación inicial de una rotonda periurbana y posibles acabados superficiales permeables.

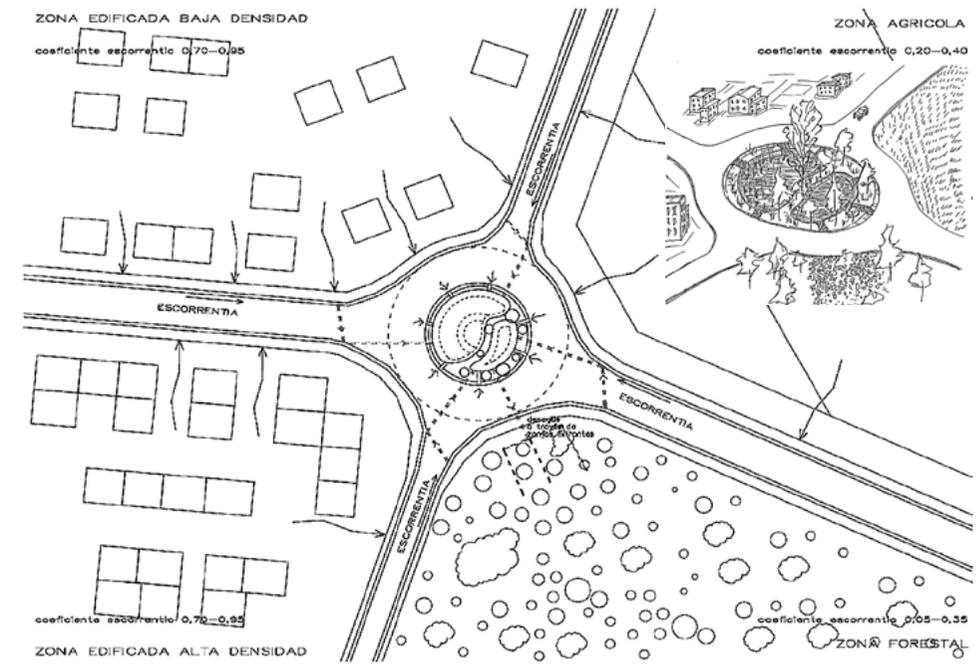


Figura 60. Esquema de diseño con almacenamiento de agua.

| **La impermeabilización de capa subsuperficial del terreno** para el caso de almacenamiento se realiza mediante una lámina de geotextil, más una lámina impermeabilizante, un fieltro geotextil resistente y se finaliza con una capa granular.

| **La selección y colocación del material granular** se realizará a partir de roca triturada y seca, piedra lavada o grava, y las pendientes serán suaves para garantizar la seguridad.

| **La vegetación** será autóctona y con la densidad apropiada.

| **La estructura de entrada y salida** está formada por los colectores de entrada y salida –tubería plástica de polietileno o polipropileno–. El conducto de salida será una tubería perforada colocada al final en el fondo del lecho y conectada a un dispositivo que permite controlar el nivel del agua. Del dispositivo regulador partirá otra tubería perforada para infiltrar el agua al terreno colindante o para utilizarla como riego de plantas leñosas.

| **El aliviadero** se añade para evacuar el excedente de agua que supera un nivel máximo predeterminado. El vertido se realiza a

un terreno apropiado y preparado para tal efecto mediante tubería perforada y zanjas filtrantes.

Adaptación del diseño a la zona climática

Teniendo en cuenta las condiciones climatológicas y la permeabilidad del terreno de implantación y tomando como ejemplo la Zona climática B y un tipo de terreno permeable, el volumen de almacenamiento en la rotonda se diseña para 660 m³, y busca tanto el almacenamiento como la infiltración, vertiendo los excedentes al terreno y a la zona forestal colindante por medio de zanjas y bandas de infiltración.

Se utilizará una solución mixta de almacenamiento hasta una cota adecuada, manteniendo un remanente de agua, e infiltrando el resto. El proceso constructivo consiste en una excavación de vaciado para el humedal artificial, la colocación de un fieltro geotextil, una lámina impermeabilizante sintética hasta cota designada y un fieltro geotextil, el relleno con piedra y grava, la colocación de las tuberías para abastecimiento, drenaje, riego y evacuación del aliviadero, y finalmente colocación de la cubierta vegetal adecuada.

Las especies vegetales utilizadas serán:

| Cantidad de agua aprovechable según climatología y superficie | | | | | | |
|---------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------|
| Zona climática | Tipo de terreno | Tipo de zona | Precipitaciones (dm ³ /m ²) | Superficie (m ²) | Coefficiente de escorrentía | Volumen de agua disponible (dm ³) |
| Zona B | Permeable | Agrícola | 221,89 | 2.500 | 0,20 | 110.945,00 |
| | | Edificación de baja densidad | 221,89 | 1.500 | 0,70 | 232.984,50 |
| | | Edificación de alta densidad | 221,89 | 1.500 | 0,95 | 316.193,25 |
| Total | | | | | | 660.122,75 |

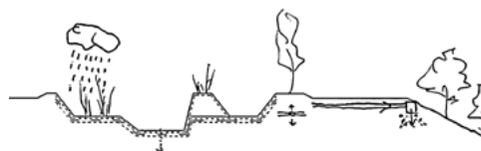


Figura 61. Esquema de sección en Zona B en terreno permeable.

| Especies vegetales | | |
|--------------------|------------|-------------------------------------------|
| Acuáticas | Emergentes | Carrizo, junco, lirio amarillo |
| | Sumergidas | Estrella de agua, ranúnculo acuático |
| | Flotantes | Nenúfar, jacinto de agua, lenteja de agua |
| Leñosas | Arbustos | Mirto, adelfa, rododendro |
| | Árboles | Higuera, serbal, ciprés, álamo negro |

Estimación del coste orientativo para diferentes soluciones:

| Rotonda con diámetro de 30 m en Zona B permeable | Cantidad | €/unidad | Importe |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|-----------|
| Desbroce y limpieza superficial del terreno por medios mecánicos | 706,50 | 0,49 | 346,19 |
| Excavación a cielo abierto con extracción de tierras | 759,00 | 2,26 | 1.715,34 |
| Excavación de zanjas de saneamiento | 30,24 | 21,31 | 644,41 |
| Excavación de zanjas de saneamiento y posterior relleno y apisonado | 75,36 | 38,83 | 2.926,23 |
| Geotextil de poliéster punzonado extendido sobre el terreno con solapes de 10 cm para el posterior relleno con tierras | 812,00 | 1,58 | 1.282,96 |
| Compactación de terreno | 609,00 | 8,08 | 4.920,72 |
| Relleno extendido y apisonado de tierras propias a cielo abierto en tongadas de 30 cm hasta compactación del 95 % según el ensayo Proctor normal | 759,00 | 7,16 | 5.434,44 |
| Relleno y extendido de piedra del lugar sin trabajar | 276,00 | 84,93 | 23.440,68 |
| Tubería de drenaje enterrada de polietileno de alta densidad ranurado de 200 mm de diámetro nominal, sobre cama de arena 10 cm de espesor, revestida con geotextil de 125 g/m ² y rellena con grava filtrante 25 cm por encima del tubo con cierre de doble solapa del paquete filtrante (realizado con el propio geotextil) | 220,00 | 44,36 | 9.759,20 |
| Pozo de registro de 100 cm de diámetro interior y de 200 cm de profundidad libre, construido con fábrica de ladrillo macizo toscó de 1 pie de espesor; enfoscado y bruñido por el interior redondeando ángulos, formación de canal en el fondo del pozo y formación de brocal asimétrico en la coronación para recibir el cerco y la tapa de hierro fundido | 2,00 | 661,45 | 1.322,90 |
| <i>Ficus carica</i> (higuera) de 14 a 16 cm de circunferencia, suministrado a raíz desnuda y plantación en hoyo de 1 x 1 x 1 m | 1,00 | 74,82 | 74,82 |
| <i>Pinus halepensis</i> (pino carrasco) de 2 a 2,50 m de altura suministrado en contenedor y plantación en hoyo de 0,8 x 0,8 x 0,8 m | 1,00 | 67,22 | 67,22 |
| <i>Populus nigra italica</i> (chopo lombardo) de 12 a 14 cm de perímetro de tronco, suministrado a raíz desnuda y plantación en hoyo de 1 x 1 x 1 m | 2,00 | 29,67 | 59,34 |
| <i>Myrtus communis</i> (mirto) de 0,4 a 0,6 m de altura, suministrado en contenedor y plantación en hoyo de 0,6 x 0,6 x 0,6 m, incluso apertura del mismo con los medios indicados, abonado, formación de alcorque y primer riego | 1,00 | 13,44 | 13,44 |
| <i>Rhododendron ponticum</i> (rododendro) de 0,6 a 0,8 m de altura, suministrado en contenedor y plantación en hoyo de 0,8 x 0,8 x 0,8 m | 1,00 | 35,30 | 35,30 |
| <i>Nerium oleander</i> (adelfa) de 1 a 1,25 m de altura, suministrado en contenedor y plantación en hoyo de 0,8 x 0,8 x 0,8 m | 2,00 | 30,74 | 61,48 |
| Macizo de plantas acuáticas emergentes, formado por <i>Phragmites australis</i> (carrizo), <i>Juncus sp</i> (junco), <i>Iris seudacorus</i> (lirio amarillo) de 0,4 a 0,6 m de altura, a razón de 6 plantas/m ² , suministradas en contenedor, comprendiendo el laboreo del terreno, el abonado, la plantación en hoyo de 0,6 x 0,6 x 0,6 m, el recebo de mantillo y el primer riego | 150,50 | 86,56 | 13.027,28 |
| Suministro y plantación de especies acuáticas sumergidas formado por <i>Callitriche palustris</i> (estrella de agua), <i>Ranunculus aquatilis</i> (ranúnculo acuático), de 0,4 a 0,6 m de altura, a razón de 6 plantas/m ² , suministradas en contenedor | 151,00 | 99,96 | 15.093,96 |
| Suministro y plantación de especies acuáticas flotantes formado <i>Nuphar</i> (nenúfar), <i>Eichoornia crassipes</i> (jacintos de agua) y <i>Lemna sp</i> (lentejas de agua), a razón de 6 plantas/m ² | 151,00 | 63,56 | 9.597,56 |

2.6. Ficha comparativa

Interior de rotonda con diámetro de 24 m en Zona climática C sobre terreno permeable y con una precipitación media anual de 395 mm.

| | Características de la instalación | Coste de la instalación | Gestión con aprovechamiento de agua | Impacto ambiental |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>INSTALACIÓN ESTÁNDAR</p>  | <ul style="list-style-type: none"> – Ronda estándar. – Riego no necesario. – Movimiento de tierra. – Acabado superficial: grava 20 cm (escorrentía 0,8). – Bordillo elevado. – No transitable. – Espacio no aprovechado. – Entorno asfalto. | <p>Coste estimado de construcción: 10.500 € (interior rotonda).</p> | <ul style="list-style-type: none"> – Vertido estimado de rotonda y entorno (Ø 50 m): 620.000 l (precipitaciones x superficie x coeficiente escorrentía). – Gasto indirecto por depuración de rotonda y entorno: 500 €*. | <ul style="list-style-type: none"> – Incremento de temperatura según acabado superficial. – Vertido directo de agua a la red general de saneamiento. – Altas concentraciones de caudal por la escorrentía. – Espacio residual no aprovechado. |
| <p>CON APROVECHAMIENTO DE AGUA</p>  | <ul style="list-style-type: none"> – Ronda con almacenamiento de agua y jardinería. – Acabado vegetal (xerojardinería). – Almacenamiento de agua en balsas de acumulación-infiltración (movimiento de tierra, impermeabilizante y zahorra). – Canalizaciones y rebosadero. | <p>Coste estimado de construcción: 12.500 €.</p> | <ul style="list-style-type: none"> – Almacenamiento agua: 100.000 l (capaz de gestionar la sexta parte del volumen anual recibido de la rotonda y su entorno). – Ahorro por no depuración: 500 €* (volumen de agua almacenado y no vertido). – Retorno del sobrecoste en 4 años. | <ul style="list-style-type: none"> – Mejora de condiciones ambientales (temperatura y humedad). – Utilidad de espacio residual. – Amortiguación de vertido a saneamiento (retención y almacenamiento). – Aprovechamiento para riego y baldeo. – Depuración de agua superficial. |

* Importe saneamiento y abastecimiento conforme a las tarifas del agua (AEAS).

3. Pavimentos

El acabado superficial de cualquier actuación urbana es la primera capa receptora del agua de lluvia. Determinará la escorrentía, la temperatura ambiental, la infiltración de agua y la posibilidad de incorporación de vegetación.

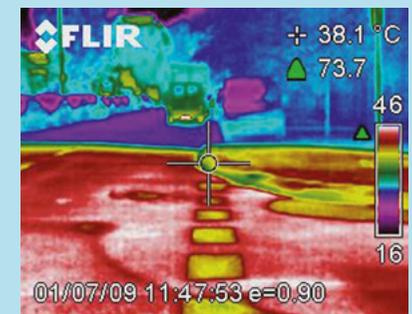


Figura 62. Fotografía y análisis termográfico de diferentes acabados superficiales.

Tipo de pavimentos según el incremento de temperatura

| | | |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Césped verde |  | Menor temperatura con humedad de pavimento |
| Césped seco | | |
| Terreno vegetado | | |
| Terreno con arbustos | | |
| Pavimento drenante relleno de césped | | |
| Pavimento drenante relleno de grava | | |
| Pavimento drenante relleno de arena | | |
| Bordillo de acera | | Mayor temperatura a menor espesor, menor compactación y material más oscuro |
| Adoquín/baldosa poroso con junta abierta sobre terreno | | |
| Adoquín/baldosa pétreo con junta abierta sobre terreno | | |
| Adoquín/baldosa pétreo con junta cerrada sobre terreno | | |
| Adoquín/baldosa poroso con junta abierta sobre hormigón | | |
| Adoquín/baldosa pétreo con junta abierta sobre hormigón | | |
| Adoquín/baldosa pétreo con junta cerrada sobre hormigón | | |
| Pavimento de exterior de madera | | |
| Pavimento sintético de goma o resina | | |
| Grava suelta | | |
| Terreno no vegetado | | |
| Arena compactada | | |
| Arena suelta | | |
| Hormigón continuo | | |
| Asfalto suelto | | |
| Asfalto continuo | | |
| Elementos metálicos | | |



Figura 64. Pavimento discontinuo permeable.

Figura 63. Tabla de temperatura en pavimentos en iguales condiciones térmicas.

3.1. Tipología

El pavimento se clasifica según su continuidad, espesor, su color, el tipo de relleno entre juntas y la base sobre la que se colocan. Para la elección del pavimento hay que tener en cuenta la climatología del lugar, el tipo de terreno (permeable o

impermeable) sobre el que se apoya, así como, el comportamiento de cada material en cuanto a rugosidad, permeabilidad, color, temperatura y porosidad.



Figura 65. Pavimentos continuos: tierra compactada, asfalto poroso, celda rellena de grava, grava estabilizada.



Figura 66. Pavimentos discontinuos: baldosa y cerámica, celda de hormigón vegetada, adoquines de hormigón y madera.

| Pavimento continuo | | Pavimento discontinuo | |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------|
| Hormigón poroso | Acabado liso Acabado desactivado | Adoquín | Cerámico Hormigón Pétreo |
| Mezcla bituminosa porosa | Convencional B60/70, B80/100 Modificada BM-3a/3b | Baldosa | Pétreo Hormigón Gres cerámico Terrazo exterior |
| Celda plástica de contención | Vegetación Grava | Celda prefabricada | Hormigón con vegetación Hormigón con grava Plástica |
| Terreno compactado | Tierra aditivada Arena Grava | Madera | Flotante sobre base plástica Reciclada con PVC |
| Grava estabilizada con resinas | | | |
| Caucho | | | |
| Cantos rodados y bolos | | | |
| Mulch orgánico | Turba Compost Mantillo de hojas Estiércol descompuesto y rico en paja Paja Cortezas | | |
| Mulch inorgánico | Plástico reciclado Vidrio reciclado Caucho | | |

3.2. Directorio de pavimentos continuos

PAVIMENTO CONTINUO DE HORMIGÓN POROSO Continuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|------------------------|
| Geometría principal | Plano continuo |
| Formato principal (cm) | Grosor entre 5 y 20 cm |
| Superficie por unidad (m ²) | — |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|--------------------------------------------|
| Material | Cemento, áridos gruesos y agua |
| Color | Gris (posibilidad de colorearlo) |
| Densidad aparente (kg/m ³) | 1.400-2.000 |
| Porosidad (%) | Para ser poroso: > 15 % (perm. 0,5-5 cm/s) |



Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| | Hormigón poroso de 8 cm, base granular de 30 cm con tubo drenante y lámina impermeabilizante sobre terreno compactado | Paso del agua a la base granular y recogida en tubo, sin llegar a filtrar al terreno |
| | Hormigón poroso de 8 cm y base granular de 30 cm sobre terreno compactado | Permeabilidad total al terreno |
| | Hormigón poroso de 5 cm, base granular y lámina impermeabilizante sobre terreno compactado | Evacuación del agua subsuperficial |

PAVIMENTO CONTINUO DE HORMIGÓN POROSO DESACTIVADO Continuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|------------------------|
| Geometría principal | Plano continuo |
| Formato principal (cm) | Grosor entre 5 y 20 cm |
| Superficie por unidad (m ²) | — |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|----------------------------------------------|
| Material | Cemento, áridos gruesos, agua y desactivante |
| Color | Depende del árido utilizado |
| Densidad aparente (kg/m ³) | 1.400-2.000 |
| Porosidad | Para ser poroso: > 15 % (perm. 0,5-5 cm/s) |



Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| | Hormigón poroso de 8 cm, base granular de 30 cm con tubo drenante y lámina impermeabilizante sobre terreno compactado | Paso del agua a la base granular y recogida en tubo, sin llegar a filtrar al terreno |
| | Hormigón poroso de 8 cm y base granular de 30 cm sobre terreno compactado | Permeabilidad total al terreno |
| | Hormigón poroso de 5 cm, base granular y lámina impermeabilizante sobre terreno compactado | Evacuación del agua subsuperficial |

PAVIMENTO DE TIERRA COMPACTADA ADITIVADA Continuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|------------------------|
| Geometría principal | Plano continuo |
| Formato principal (cm) | Espesor entre 5 y 6 cm |
| Superficie por unidad (m ²) | — |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|------------------------------------------|
| Material | Tierra con aditivos |
| Color | Dependiendo del terreno y tonos a elegir |
| Densidad aparente (kg/m ³) | Dependiendo del terreno a compactar |
| Porosidad | Variable según componentes |



PAVIMENTO MEZCLA BITUMINOSA POROSA CONVENCIONAL B80/100 Continuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|-------------------------|
| Geometría principal | Plano continuo |
| Formato principal (cm) | Espesor superior a 3 cm |
| Superficie por unidad (m ²) | — |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Material | Combinación de áridos y ligantes hidrocarbonatados |
| Color | Variable según árido |
| Densidad aparente (kg/m ³) | En función de componentes: 1,8-1,9 |
| Porosidad | 20-30 % |



Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| | Pavimento de tierra compactada y aditivada de 5 cm de espesor y subbase de zahorra compactada de 20 cm sobre terreno compactado | Permeabilidad al terreno |
| | Pavimento de tierra compactada y aditivada de 5 cm de espesor, capa de 30 cm de áridos con granulometría inferior a 20 mm, tubo de drenaje y lámina impermeabilizante sobre terreno compactado | Paso del agua a la base granular, y recogida en tubo, sin llegar a filtrar al terreno |
| | Pavimento de tierra compactada y aditivada de 5 cm de espesor | Paso del agua al terreno |

Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Mezcla bituminosa porosa convencional B60/70, capa de 6 cm de áridos de granulometría inferior a 20 mm y subbase granular de 30 cm con tubo drenante sobre terreno compactado poco permeable | Paso del agua a la base granular y recogida en tubo, aumentando la capacidad de absorción del terreno |
| | Mezcla bituminosa porosa convencional B60/70, capa de áridos de 6 cm de espesor con granulometría inferior a 20 mm, lámina geotextil, subbase granular de 30 cm con tubo drenante y lámina geotextil sobre terreno compactado | Paso del agua a la base granular y recogida en tubo, aumentando la capacidad de absorción del firme |
| | Mezcla bituminosa porosa convencional B60/70, capa de áridos de 6 cm de espesor con granulometría inferior a 20 mm y subbase granular sobre terreno compactado | Permeabilidad al terreno |

PAVIMENTO MEZCLA BITUMINOSA POROSA MODIFICADA BM-3a/3b Continuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|----------------|
| Geometría principal | Plano continuo |
| Formato principal (cm) | Grosor: > 3 cm |
| Superficie por unidad (m ²) | — |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|-------------------------------------------|
| Material | Mezcla bituminosa convencional modificada |
| Color | Variable según árido |
| Densidad aparente (kg/m ³) | En función de componentes: 1,8-1,9 |
| Porosidad | 20-30 % |



Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Mezcla bituminosa porosa convencional BM-3b, capa de áridos de 6 cm con granulometría inferior a 20 mm, subbase granular de 30 cm con tubo drenante y lámina impermeabilizante | Paso del agua a la base granular y recogida en tubo, aumentando la capacidad de absorción del firme |
| | Mezcla bituminosa porosa convencional BM-3b, capa de áridos de 6 cm con granulometría inferior a 20 mm, lámina geotextil, subbase granular de 3 cm con tubo drenante y lámina geotextil | Paso del agua a la base granular y recogida en tubo, aumentando la capacidad de absorción del terreno |
| | Mezcla bituminosa porosa convencional BM-3b de 3 cm, capa de áridos de 6 cm con granulometría inferior a 20 mm y subbase granular sobre terreno compactado | Permeabilidad al terreno |

VEGETACIÓN CONTENIDA EN CELDA PLÁSTICA Continuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|---------------------------|
| Geometría principal | Módulos rectangulares |
| Formato principal (cm) | 40 × 60 × 4 / 50 × 39 × 4 |
| Superficie por unidad (m ²) | 1 m ² |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Material | Celosía de polietileno de alta densidad |
| Color | Verde |
| Densidad aparente (kg/m ³) | Densidad de la tierra vegetal |
| Porosidad | Porosidad de la tierra vegetal |



Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| | Césped, rejilla de contención vegetal de 4 cm, lámina geotextil, capa de arena de 4 cm y capa de grava de entre 10 y 20 cm | Permeabilidad al terreno |
| | Césped, rejilla de contención vegetal de 4 cm, base granular de 6 cm, subbase granular con tubo de drenaje de 250 mm de 30 cm y lámina impermeabilizante | Paso del agua al sistema de evacuación sin infiltración al terreno |
| | Césped, rejilla plástica de contención, base granular de 6 cm, capa de arena, lámina geotextil, celda plástica para acumulación, lámina geotextil, capa de arena sobre terreno natural | Permeabilidad al terreno con retención previa en celdas |

GRAVA CONTENIDA EN CELDA PLÁSTICA Continuo

Morfología

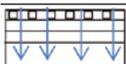
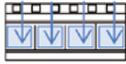
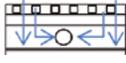
| | |
|-----------------------------------------|-----------------------------|
| Geometría principal | Módulos rectangulares |
| Formato principal (cm) | 120 × 240 × 4 / 39 × 58 × 3 |
| Superficie por unidad (m ²) | — |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Material | Polipropileno extruido |
| Color | Variable según marca |
| Densidad aparente (kg/m ³) | Grava de entre 1.300 y 1.400 con granulometría de 10 a 20 mm |
| Porosidad | 25-40 % |



Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
|  | Grava contenida en rejilla plástica, gravilla, base granular sobre terreno | Permeabilidad al terreno |
|  | Grava contenida en rejilla plástica, capa de arena, lámina geotextil, celda plástica para acumulación y lámina impermeabilizante sobre terreno | Paso del agua a la celda de acumulación sin infiltrar al terreno |
|  | Grava contenida en rejilla plástica, base granular de 6cm, subbase granular de 30 cm con tubo de drenaje y lamina impermeabilizante sobre terreno | Paso del agua a sistema de evacuación, sin infiltrar al terreno |

GRAVA ESTABILIZADA CON RESINAS Continuo

Morfología

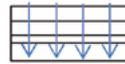
| | |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Geometría principal | Plano continuo |
| Formato principal (cm) | Grosor de la capa 3 veces mayor a la dimensión del elemento agregado de mayor grosor |
| Superficie por unidad (m ²) | — |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Material | Estabilizador líquido (polímero o resina) mezclado con grava |
| Color | El color de la grava |
| Densidad aparente (kg/m ³) | 1.800 (aprox.) |
| Porosidad | 20 % (permeabilidad: 0,68 cm/s) |



Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
|  | Áridos estabilizados de espesor 3 veces superior al árido de mayor tamaño, capa de grava de 5 cm y capa de arena de 5 cm sobre terreno | Permeabilidad al terreno |
|  | Áridos estabilizados de espesor 3 veces superior al árido de mayor tamaño y capa de zahorra sobre terreno | Permeabilidad al terreno |

CAUCHO Continuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Geometría principal | Plano continuo |
| Formato principal (cm) | Grosor tres veces superior a la dimensión del más grueso de los agregados |
| Superficie por unidad (m ²) | — |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Material | Estabilizador líquido (polímero o resina) mezclado con caucho |
| Color | Variable |
| Densidad aparente (kg/m ³) | Densidad del caucho 950-970 |
| Porosidad | 0,1 cm/s |



Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| | Pavimento continuo de caucho, capa de grava de 5 cm y capa de arena de 5 cm sobre terreno | Permeabilidad al terreno |
| | Pavimento continuo de caucho y capa de zahorra sobre terreno | Permeabilidad al terreno |

ARENA COMPACTADA Continuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|-------------------------------------|
| Geometría principal | Dependiendo de la granulometría |
| Formato principal (cm) | Granulometría entre 0,006 y 0,02 cm |
| Superficie por unidad (m ²) | — |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Material | Sílice en cuarzo, volcánica, caliza molida y albero |
| Color | Depende del tipo de roca |
| Densidad aparente (kg/m ³) | 1.400-1.800 |
| Porosidad | 20-50 % |



Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| | Arena compactada y lámina antirraíces sobre terreno natural | Permeabilidad total al terreno |
| | Arena compactada, lámina antirraíces y lámina impermeabilizante sobre terreno natural | Evacuación del agua subsuperficial |

GRAVA COMPACTADA Continuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|--------------------------------------|
| Geometría principal | Depende de las dimensiones del árido |
| Formato principal (cm) | Granulometría entre 0,2 y 6 cm |
| Superficie por unidad (m ²) | — |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Material | Caliza, granito, dolomita, cuarzo, basalto y arenisca |
| Color | Depende del tipo de roca |
| Densidad aparente (kg/m ³) | 1.500-1.800 |
| Porosidad | 25-40 % |



Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| | Capa de grava, capa de arena de 30 cm, lámina antirraíces, tubo drenante y lámina impermeabilizante sobre terreno compactado | Paso del agua a la base granular y recogida en tubo, sin llegar a filtrar al terreno |
| | Capa de grava y lámina antirraíces sobre terreno natural | Permeabilidad total al terreno |
| | Capa de grava, capa de arena de 30 cm, lámina antirraíces y lámina impermeabilizante sobre terreno compactado | Evacuación del agua subsuperficial |

CANTOS RODADOS Continuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| Geometría principal | Dependiendo de las dimensiones del árido |
| Formato principal (cm) | Granulometría entre 6 y 25 cm |
| Superficie por unidad (m ²) | — |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Material | Caliza, granito, dolomita, cuarzo, basalto y arenisca |
| Color | Depende del tipo de roca |
| Densidad aparente (kg/m ³) | 1.400-2.000 |
| Porosidad | > 40 % (teniendo en cuenta el conjunto) |



Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| | Cantos rodados, capa de arena de 30 cm de espesor, lámina antirraíces, tubo drenante y lámina impermeabilizante sobre terreno compactado | Paso del agua a la base granular y recogida en tubo, sin llegar a filtrar al terreno |
| | Cantos rodados y lámina antirraíces sobre terreno natural | Permeabilidad total al terreno |
| | Cantos rodados, capa de arena de 30 cm de espesor, lámina antirraíces y lámina impermeabilizante sobre terreno compactado | Evacuación del agua subsuperficial |

BOLOS Continuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Geometría principal | Dependiendo de la dimensiones del árido |
| Formato principal (cm) | Granulometría entre 20 y 30 cm |
| Superficie por unidad (m ²) | — |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Material | Bolos |
| Color | Depende del tipo de roca |
| Densidad aparente (kg/m ³) | 1.400-2.000 |
| Porosidad | > 40 % (teniendo en cuenta el conjunto) |

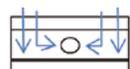


Gestión del agua

Esquema

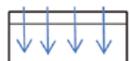
Sistema (orden: capa superior a inferior)

Comportamiento



Bolos, capa de arena de 30 cm de espesor, lámina antirraíces, tubo drenante y lámina impermeabilizante sobre terreno compactado

Paso del agua a la base granular y recogida en tubo, sin llegar a filtrar al terreno



Bolos y lámina antirraíces sobre terreno natural

Permeabilidad total al terreno



Bolos, capa de arena de 30 cm de espesor, lámina antirraíces y lámina impermeabilizante sobre terreno compactado

Evacuación del agua subsuperficial

MULCH ORGÁNICO / INORGÁNICO Continuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|-------------------------------|
| Geometría principal | Plano continuo |
| Formato principal (cm) | Depende del material empleado |
| Superficie por unidad (m ²) | — |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Material | Corteza de árbol, restos de madera, plástico reciclado, etc. |
| Color | Variable |
| Densidad aparente (kg/m ³) | Baja (depende del material empleado) |
| Porosidad | Alta (depende del material empleado) |

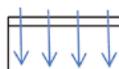


Gestión del agua

Esquema

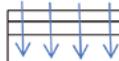
Sistema (orden: capa superior a inferior)

Comportamiento



Mulch sobre terreno natural

Permeabilidad al terreno



Mulch y zorra sobre terreno natural

Permeabilidad al terreno

3.3. Directorio de pavimentos discontinuos

ADOQUÍN CERÁMICO Discontinuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Geometría principal | Rectangulares |
| Formato principal (cm) | 20 × 5 × 5 / 12 × 18 × 6 / 20 × 10 × 5 / 20 × 20 × 8 |
| Superficie por unidad (m ²) | 0,010 / 0,021 / 0,020 / 0,040 |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|----------|
| Material | Cerámica |
| Color | Variable |
| Densidad aparente (kg/m ³) | 2.300 |
| Porosidad (%) | < 15 % |



Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| | Adoquín cerámico con junta abierta, capa de arena de 3 cm de espesor, lámina geotextil, base granular de 6 cm, subbase granular de 30 cm con tubo dren y lámina impermeabilizante sobre terreno compactado | Paso del agua a sistema de evacuación. No pasa al terreno |
| | Adoquín cerámico con junta abierta, capa de arena de 3 cm de espesor, lámina geotextil, celda plástica para acumulación y lámina impermeabilizante sobre terreno compactado | Acumulación del agua en depósito sin infiltrar al terreno |
| | Adoquín cerámico con junta abierta, capa de arena de 3 cm de espesor, lámina geotextil, celda plástica para acumulación, lámina de geotextil y capa de arena de 5 cm sobre terreno compactado | Permeabilidad al terreno con retención previa en celdas de acumulación |

ADOQUÍN POROSO DE HORMIGÓN Discontinuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------|
| Geometría principal | Rectangular o rectangular con hendiduras |
| Formato principal (cm) | 17,3 × 20,8 × 7 / 20 × 20 × 7 / 20 × 20 × 8 |
| Superficie por unidad (m ²) | 0,035 / 0,040 |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|-----------------|
| Material | Hormigón poroso |
| Color | Gris |
| Densidad aparente (kg/m ³) | 1.900-2.000 |
| Porosidad | 18-25 % |



Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Adoquín poroso con junta abierta, capa de gravilla de 4 cm de espesor y capa de grava de entre 25 y 35 cm sobre terreno compactado | Permeabilidad al terreno incrementada por junta abierta y porosidad del material |
| | Adoquín poroso con junta abierta con vegetación, capa de gravilla de 4 cm con granulometría de entre 2 y 5 mm, capa de grava de entre 25 y 35 cm con granulometría de entre 2 y 22 mm sobre terreno compactado | Permeabilidad al terreno a través de toda la superficie del acabado |
| | Adoquín de hormigón con junta abierta, capa de arena de 3 cm de espesor, lámina geotextil, celda plástica de acumulación, lámina geotextil y capa de arena sobre terreno compactado | Amortiguamiento de agua de lluvia y permeabilidad al terreno con retención previa en celdas |

ADOQUÍN PÉTREO Discontinuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| Geometría principal | Rectangular o cuadrado |
| Formato principal (cm) | 18 x 9 x 12 / 10 x 8 x 10 / 18 x 12 x 12 |
| Superficie por unidad (m ²) | 0,016 / 0,080 / 0,020 |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Material | Arenisca, granito y caliza |
| Color | Depende del material |
| Densidad aparente (kg/m ³) | 2.250 (arenisca) / 2.600 (granito) / 2.200 (caliza) |
| Porosidad (%) | 5-35 (arenisca) / 1-10 (granito) / 0,1-25 (caliza) |



BALDOSA PÉTREA Discontinuo

Morfología

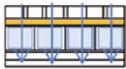
| | |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------|
| Geometría principal | Rectangular o rectangular con hendiduras |
| Formato principal (cm) | 17,3 x 20,8 x 7 / 20 x 20 x 7 / 20 x 20 x 8 |
| Superficie por unidad (m ²) | 0,035 / 0,040 |

Características principales

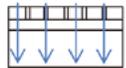
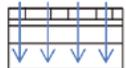
| | |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Material | Caliza, granito y arenisca |
| Color | Depende del tipo de material |
| Densidad aparente (kg/m ³) | 2.250 (arenisca) / 2.600 (granito) / 2.200 (caliza) |
| Porosidad (%) | 5-35 (arenisca) / 1-10 (granito) / 0,1-25 (caliza) |



Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
|  | Adoquín pétreo con junta abierta, base de arena de 3 cm, base granular de 6 cm, subbase granular de 30 cm con tubo drenante y lámina impermeabilizante sobre terreno compactado | Paso del agua al sistema de evacuación, sin infiltración al terreno |
|  | Adoquín pétreo con junta abierta, base de arena de 3 cm, lámina geotextil, celda plástica para acumulación y lámina impermeabilizante sobre terreno compactado | Acumulación del agua en depósito sin infiltrar al terreno |
|  | Adoquín pétreo con junta abierta, capa de arena de 3 cm, lámina geotextil, celda plástica para acumulación, lámina geotextil y capa de arena de 5 cm sobre terreno compactado | Permeabilidad al terreno con retención previa en celdas de acumulación |

Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  | Baldosa pétreo con junta abierta y capa de arena sobre terreno compactado | Permeabilidad al terreno a través de toda la superficie del acabado |
|  | Baldosa pétreo con junta abierta, capa de arena, lámina geotextil y capa de zorra sobre terreno compactado | Permeabilidad al terreno a través de toda la superficie del acabado |
|  | Baldosa pétreo con junta abierta, capa de arena de 3 cm, lámina geotextil, celda plástica de acumulación, lámina geotextil y capa de arena sobre terreno compactado | Amortiguamiento agua lluvia y permeabilidad al terreno con retención previa en celdas |

BALDOSA CERÁMICA DE GRES Discontinuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|---------------------------------------|
| Geometría principal | Rectangular o cuadrada |
| Formato principal (cm) | 40 × 40 / 40 × 60 / 60 × 60 / 80 × 80 |
| Superficie por unidad (m ²) | 0,16 / 0,24 / 0,36 / 0,64 |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|----------------|
| Material | Gres cerámico |
| Color | A elección |
| Densidad aparente (kg/m ³) | 1.900 (aprox.) |
| Porosidad (%) | 1,5-6 % |



BALDOSAS DE HORMIGÓN Discontinuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|---------------------------------------|
| Geometría principal | Rectangular o cuadrada |
| Formato principal (cm) | 40 × 40 / 40 × 60 / 60 × 60 / 80 × 80 |
| Superficie por unidad (m ²) | 0,16 / 0,24 / 0,36 / 0,64 |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Material | Hormigón |
| Color | Gris, marfil, blanco, amarillo, naranja, rojo, verde... |
| Densidad aparente (kg/m ³) | 2.500 (aprox.) |
| Porosidad | — |



Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| | Baldosas cerámica con junta abierta, base de arena de 3 cm de espesor, lámina geotextil y base granular sobre terreno compactado | Permeable al terreno |
| | Baldosas cerámica con junta abierta, capa de arena de 3 cm, lámina geotextil y capa de zahorra sobre terreno compactado | Permeable al terreno |
| | Baldosa cerámica con junta abierta, capa de arena de 3 cm, lámina geotextil, celda plástica para acumulación y lámina impermeabilizante sobre capa de arena | Drenaje a las celdas de acumulación sin infiltrar al terreno |

Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| | Baldosas de hormigón con junta abierta, capa de arena de 3 cm, lámina geotextil y base granular sobre terreno compactado | Permeable al terreno |
| | Baldosas de hormigón con junta abierta, capa de arena de 3 cm y capa de hormigón poroso de 12 cm sobre terreno compactado | Permeable al terreno |
| | Baldosa de hormigón con junta abierta, capa de arena de 3 cm, lámina geotextil, celda plástica para acumulación y lámina impermeabilizante sobre capa de arena. | Drenaje a las celdas de acumulación sin infiltrar al terreno |

BALDOSA DE TERRAZO EXTERIOR Discontinuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Geometría principal | Rectangular o cuadrada |
| Formato principal (cm) | 25 × 25 / 30 × 30 / 33 × 33 / 40 × 40 / 50 × 50 / 33 × 50 / 40 × 60 |
| Superficie por unidad (m ²) | 0,062 / 0,09 / ... / 0,24 |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|------------------------------------|
| Material | Conglomerado de piedra con cemento |
| Color | Varios |
| Densidad aparente (kg/m ³) | 1.000-1.400 |
| Porosidad (%) | 10 % |



CELDA PREFABRICADAS DE HORMIGÓN CON VEGETACIÓN Discontinuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|-----------------------------|
| Geometría principal | Rectangular o cuadrada |
| Formato principal (cm) | 40 × 40 / 40 × 60 / 60 × 60 |
| Superficie por unidad (m ²) | 0,16 / 0,24 / 0,36 |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|----------|
| Material | Hormigón |
| Color | Gris |
| Densidad aparente (kg/m ³) | — |
| Porosidad | — |



Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| | Baldosa de hormigón con junta abierta, capa de arena de 3 cm, lámina geotextil, y base granular sobre terreno compactado | Permeable al terreno |
| | Baldosa de hormigón con junta abierta, capa de arena de 3 cm y capa de hormigón poroso de 12 cm sobre terreno compactado | Permeable al terreno |
| | Baldosa de hormigón con junta abierta, capa de arena de 3 cm, lámina geotextil, celda plástica para acumulación y lámina impermeabilizante sobre base de arena | Drenaje a las celdas de acumulación sin infiltrar al terreno |

Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| | Vegetación, celda prefabricada de hormigón, capa de arena de 3 cm, lámina geotextil y base granular sobre terreno compactado | Permeabilidad al terreno |
| | Vegetación, celda prefabricada de hormigón, base de arena de 3 cm, lámina geotextil, celda plástica de acumulación, lámina impermeabilizante y capa de arena sobre terreno compactado | Paso del agua a las celdas de acumulación sin infiltrar al terreno |

CELDAS PREFABRICADAS DE HORMIGÓN CON GRAVA

Discontinuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|-----------------------------|
| Geometría principal | Rectangular o cuadrada |
| Formato principal (cm) | 40 × 40 / 40 × 60 / 60 × 60 |
| Superficie por unidad (m ²) | 0,16 / 0,24 / 0,36 |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|----------|
| Material | Hormigón |
| Color | Gris |
| Densidad aparente (kg/m ³) | — |
| Porosidad (%) | — |



Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| | Grava, celda prefabricada de hormigón, capa de arena de 3 cm, lámina geotextil y base granular sobre terreno compactado | Permeabilidad al terreno |
| | Grava, celda prefabricada de hormigón, capa de arena de 3 cm, lámina geotextil, celda plástica de acumulación, lámina impermeabilizante y capa de arena sobre terreno compactado | Paso del agua a las celdas de acumulación sin infiltrar al terreno |

MADERA FLOTANTE SOBRE BASE PLÁSTICA

Discontinuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|------------------------|
| Geometría principal | Rectangular o cuadrada |
| Formato principal (cm) | 30 × 30 |
| Superficie por unidad (m ²) | 0,09 |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|-----------------------------------|
| Material | Láminas de madera + base plástica |
| Color | Variable |
| Densidad aparente (kg/m ³) | — |
| Porosidad | — |



Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| | Madera flotante sobre terreno natural | Filtración al terreno |
| | Madera flotante, capa de arena de 3 cm, lámina geotextil, celda plástica para acumulación y lámina impermeabilizante sobre terreno compactado | Acumulación del agua en depósito sin infiltrar al terreno |
| | Madera flotante, capa de arena de 3 cm, lámina geotextil, celda plástica para acumulación, lámina geotéxtil y capa de arena de 5 cm sobre terreno compactado | Permeabilidad al terreno con retención previa en celdas de acumulación |

PAVIMENTO RECICLADO DE MADERA CON PVC Discontinuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|-------------|
| Geometría principal | Rectangular |
| Formato principal (cm) | 14 x 50 |
| Superficie por unidad (m ²) | 0,07 |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|------------------------------------------|
| Material | Madera reciclada con PVC sobre rastreles |
| Color | Variable |
| Densidad aparente (kg/m ³) | — |
| Porosidad (%) | — |



REJILLA PLÁSTICA Discontinuo

Morfología

| | |
|-----------------------------------------|-------------|
| Geometría principal | Rectangular |
| Formato principal (cm) | 25 x 25 |
| Superficie por unidad (m ²) | 0,062 |

Características principales

| | |
|----------------------------------------|--------------------------------|
| Material | Polipropileno de alta densidad |
| Color | Variable |
| Densidad aparente (kg/m ³) | 980 |
| Porosidad | — |



Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| | Madera reciclada con PVC sobre rastreles, cámara de aire y capa de hormigón poroso sobre terreno natural | Permeabilidad al terreno con predominio de la evacuación subsuperficial |
| | Madera reciclada con PVC sobre rastreles, cámara de aire, capa de arena de 3 cm, lámina geotéxtil, celda plástica para acumulación y lámina impermeabilizante sobre terreno compactado | Acumulación del agua en depósito sin infiltrar al terreno |
| | Madera reciclada con PVC sobre rastreles, cámara de aire, capa de arena de 3 cm, lámina geotéxtil, celda plástica para acumulación, lámina geotéxtil y capa de arena de 5 cm sobre terreno compactado | Permeabilidad al terreno con retención previa en celdas de acumulación |

Gestión del agua

| Esquema | Sistema (orden: capa superior a inferior) | Comportamiento |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| | Pavimento plástico permeable, base granular, lámina geotéxtil, celda de infiltración y lámina geotéxtil sobre terreno natural | Permeable al terreno |
| | Pavimento plástico permeable, base granular, capa de arena, lámina geotéxtil, celda plástica de contención, lámina impermeabilizante y capa de arena sobre terreno natural | Paso del agua a las celdas de acumulación sin infiltrar al terreno |
| | Pavimento plástico permeable, base granular, capa de arena, lámina geotéxtil, celda plástica de acumulación, lámina geotéxtil, capa de arena y lámina geotéxtil sobre terreno natural | Permeabilidad al terreno con retención previa en celdas |

4. Elementos urbanos

La gestión del agua en el medio urbano está directamente relacionada con el tratamiento de sus superficies y los elementos que lo conforman.

Las recomendaciones de este apartado se centran en recuperar la capacidad drenante del suelo y reducir problemas como la escorrentía urbana, la concentración de caudales punta y el efecto "isla de calor".



Figura 67. Alcorque permeable.

4.1. Justificación

Las edificaciones e infraestructuras urbanas repercuten en el comportamiento del agua de lluvia, por eso alguno de los problemas a prevenir son:

| **El exceso de impermeabilización del terreno.** La modificación de la permeabilidad, la rugosidad y vegetación en el terreno alteran el ciclo natural del agua. La utilización de firmes impermeables disminuye considerablemente la capacidad de infiltración y de evaporación.



Figura 68. Inundación en casco urbano.

| **La escorrentía, el caudal pico y la inundación.** La escorrentía urbana se ve incrementada y concentrada por el exceso de impermeabilización, provocando inundaciones, la saturación de la red de evacuación y problemas en las estaciones depuradoras.

| **La desnaturalización.** Cualquier actuación urbanística modifica el ecosistema preexistente, sustituyendo flora y fauna por otros elementos, y transformando los cauces naturales en conducciones y canalizaciones.



Figura 69. Detalle de alcorque inundado.

| **El efecto "isla de calor".** El firme impermeable es habitualmente bituminoso, oscuro y con gran capacidad de absorción térmica, lo que contribuye significativamente al incremento de la temperatura en los núcleos urbanos (acumulación de calor en las horas de mayor radiación y dificultad de disipación durante los periodos nocturnos).



Figura 70. Zona de tránsito y espacios vegetados.

| **La contaminación difusa.** Los metales pesados, los hidrocarburos y los aceites de los vehículos a motor se van acumulando en las capas superficiales y son arrastrados por las lluvias (especialmente en pavimentos impermeables), provocando una concentración de los contaminantes.

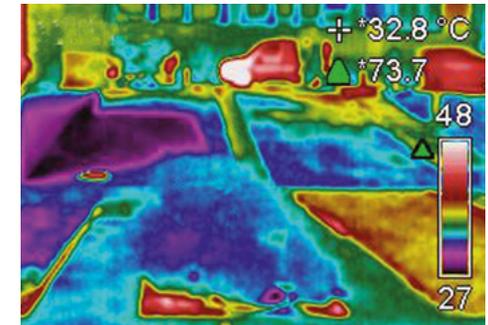


Figura 71. Termografía de elementos urbanos.



Figura 72. Ejemplo de zona recreativa.



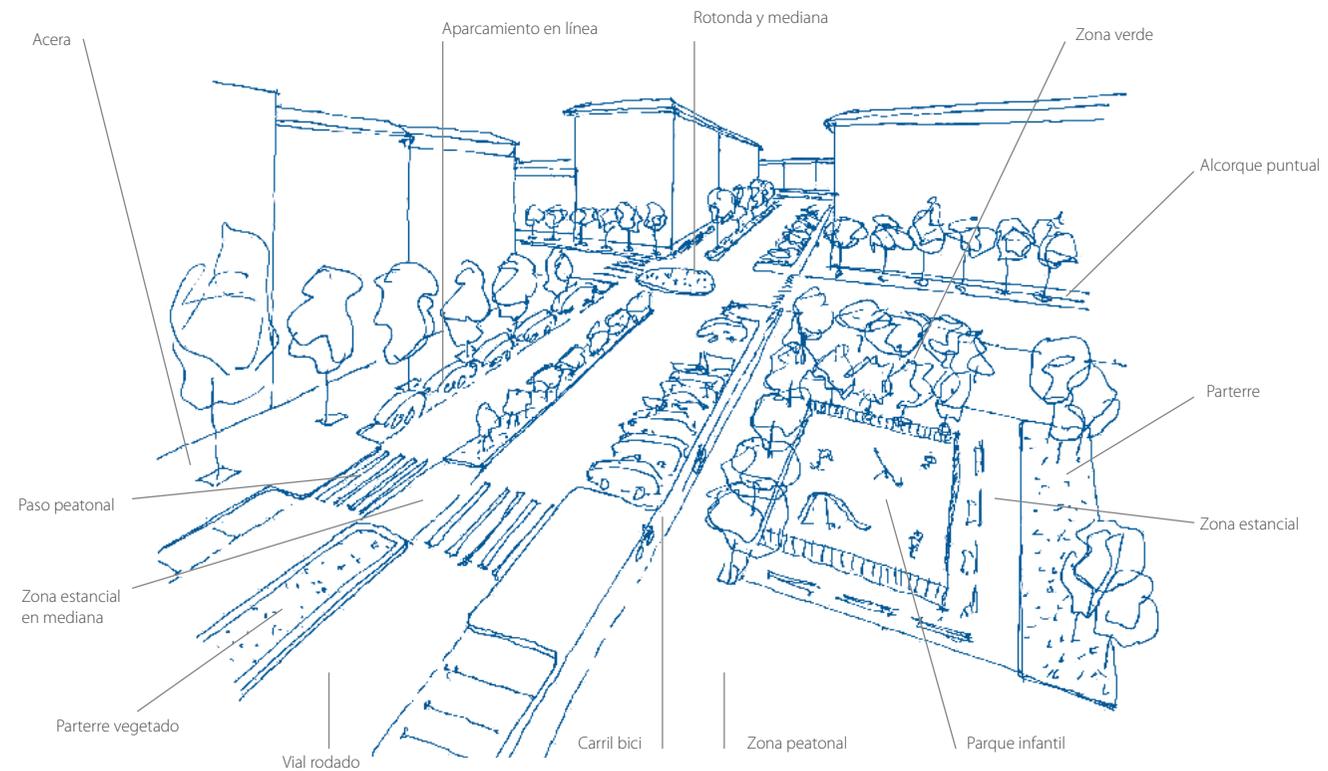
Figura 73. Ejemplo de aparcamiento permeable.



Figura 74. Ejemplo de zona de juegos.

4.2. Tipología

La multitud de elementos que conforman el paisaje urbano y que intervienen en la gestión del agua de lluvia pueden dividirse en estructuras lineales y superficiales, y a su vez en transitables o no transitables.



Estructura lineal

Es una zona de circulación diferenciada según la frecuencia de uso y el tipo de tráfico.

| Estructura lineal | | Frecuencia de uso | Carga |
|--------------------------------------|-------------------------|-------------------|------------------|
| Área de tránsito | Calzada | Media-alta | Carga media-alta |
| | Aparcamientos | Media-baja | Carga alta |
| | Carril bici | Media-baja | Carga media-baja |
| | Acera | Media-alta | Carga media-baja |
| Elementos auxiliares transitables | Alcorque transitable | Baja | Carga baja |
| | Paso en mediana | Media | Carga media-baja |
| Nivel de accesibilidad | | | |
| Elementos auxiliares no transitables | Alcorque no transitable | Media-baja | |
| | Franja de biorretención | Baja | |
| | Mediana | Media-baja | |
| | Rotonda | Baja | |

Estructura superficial

Es una zona estancial dividida en área de tránsito y elementos auxiliares.

| Estructura superficial | | Frecuencia de uso | Carga |
|--------------------------------------|------------------------------|-------------------|------------------|
| Área de tránsito | Plaza | Media-alta | Carga media-alta |
| | Parque | Media | Carga media |
| | Zona de juego | Media-baja | Carga alta |
| Nivel de accesibilidad | | | |
| Elementos auxiliares no transitables | Alcorque no transitable | Media-baja | |
| | Zona puntual de infiltración | Media-baja | |
| | Parterre | Media/alta | |
| | Franja de biorretención | Baja | |
| | Humedal para infiltración | Nula | |

4.3. Recomendaciones de diseño

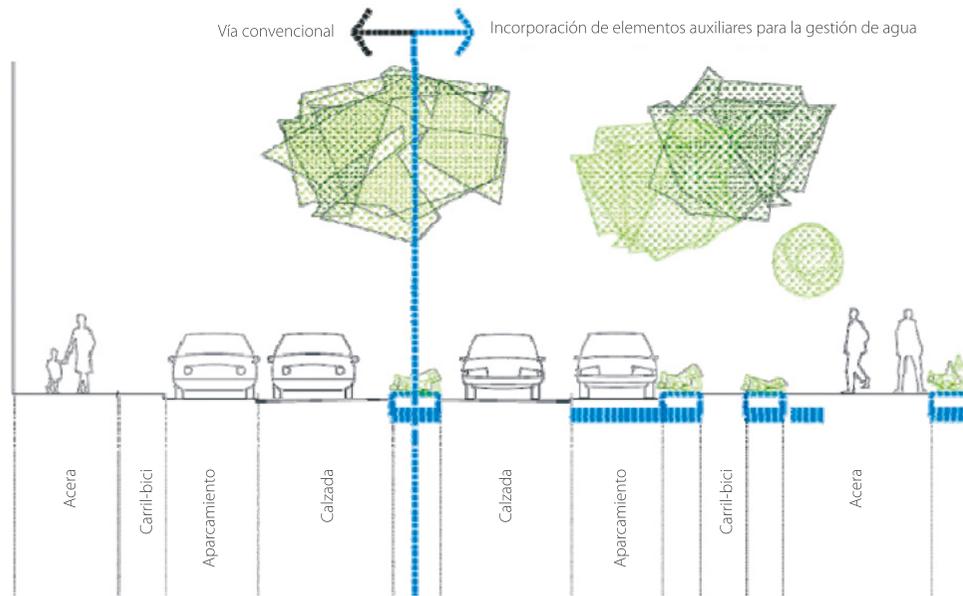


Figura 75. Esquema comparativo de una vía convencional y una vía mejorada.

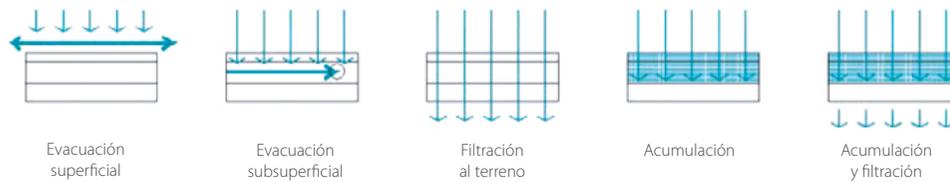


Figura 76. Esquema del flujo de los tratamientos de agua de lluvia.

Las oportunidades de mejora del tratamiento del agua de lluvia son múltiples y variadas, y se pueden abordar con diferentes enfoques, que desarrollamos a continuación.

Criterios según el ancho de la calle

| Calle estrecha. Se recomienda incluir alcortes permeables transitables, pavimentos permeables, la recogida de agua de lluvia para infiltración y el uso de vegetación de pequeño porte.

| Calle media. Se recomienda incluir alcortes permeables, zonas puntuales de infiltración, pavimentos permeables, la recogida de agua de lluvia para infiltración y el uso de vegetación de porte medio.

| Calle amplia. Son aplicables las mismas recomendaciones que para el caso de la calle media, introduciendo medianas permeables, tratamiento de agua superficial, franjas de biorremediación y el uso de vegetación de porte grande en vez de porte medio.



Figura 77. Esquema de calle estrecha.

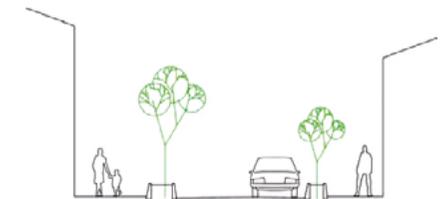


Figura 78. Esquema de calle media.

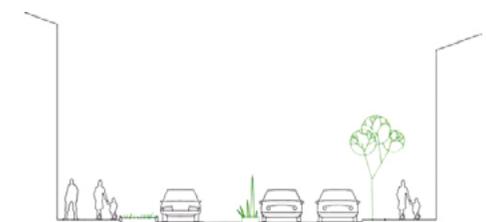


Figura 79. Esquema de calle amplia.

Criterios según la gestión del agua

El objetivo es ralentizar, detener e infiltrar el agua de lluvia, intentando recuperar el ciclo natural del agua a través de acciones que favorezcan los siguientes procesos:

- | **La infiltración**, siempre que el suelo lo permita y garantizando la calidad del agua.
- | **La acumulación**, para prevenir las inundaciones y la concentración de escorrentía.
- | **La conducción**, para ralentizar la velocidad del agua.
- | **La evacuación**, hacia la red general.

Todo ello puede resumirse en diseñar un “urbanismo cóncavo”, incorporando el agua al diseño mediante las siguientes acciones:

- | Inclinan las pendientes hacia las zonas de recogida de agua.
- | Incorporan los sistemas de drenaje perimetral en torno a los elementos urbanos.
- | Incorporan elementos puntuales de infiltración.
- | Incluyen zonas de biorretención, franjas filtrantes y zonas de almacenamiento.
- | Interconectan los elementos urbanos, como los alcorques en serie.
- | Construyen una red de evacuación superficial complementaria a la red de recogida general.

Algunos ejemplos son:

- | **El pavimento permeable** que permite la infiltración directa al terreno.

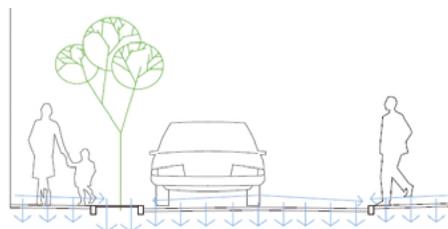


Figura 80. Esquema de pavimento con pendiente orientada hacia los elementos auxiliares.

- | **El elemento puntual o lineal de acumulación** que mejora las condiciones de la vegetación.

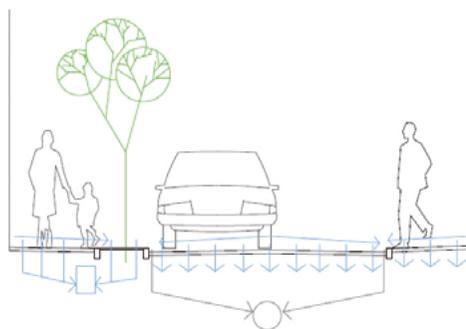


Figura 81. Esquema de elemento de acumulación puntual y lineal.

- | **El dren permeable** con gran capacidad que permite prevenir los problemas ocasionados por fuertes precipitaciones.

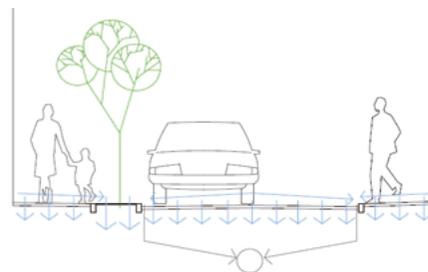


Figura 82. Esquema de pavimento con dren permeable y otros elementos de infiltración.

- | **El vial con elementos de transporte ralentizado** y elementos lineales o puntuales de infiltración.

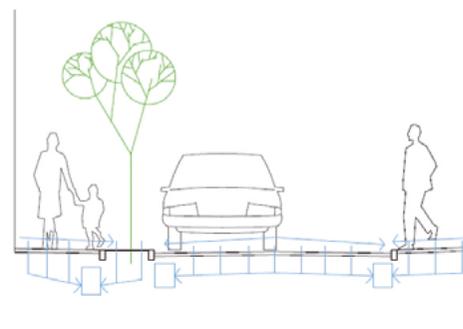
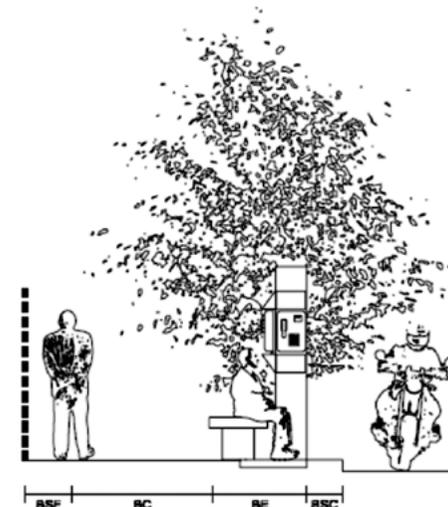


Figura 83. Esquema de transporte ralentizado e infiltración.

Criterios en acera

El ancho de acera depende fundamentalmente de la vía a la que acompaña. Habitualmente disponen de bandas de servicio de fachada, de circulación, de equipamiento y de servicio de calzada.



- BSF Banda servicio fachada
- BC Banda circulación
- BE Banda equipamiento
- BSC Banda servicio calzada

Figura 84. Recomendaciones de acera según Instrucción de Vía Pública, Ayuntamiento de Madrid.

| Ancho de acera recomendado | | |
|---------------------------------------|-----------------|------------|
| Tipo | Recomendado (m) | Mínimo (m) |
| Vía urbana | 6,00 | 4,00 |
| Vía de distrito | 6,00 | 5,00 |
| Vía local colectora de 2 carriles | 6,00 | 3,00 |
| Vía local colectora \geq 4 carriles | 6,00 | 4,00 |
| Vía local de acceso | 3,00 | 2,50 |
| Sección útil mínima transitable | 1,5 | |

| Banda de afección sobre acera | |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| Afección por contigüidad | Ancho de banda afectada (m) |
| Calzada de circulación | 0,45 |
| Banda de estacionamiento | 0,45 |
| Muro o verja | 0,45 |
| Edificación | 0,60 |
| Edificación comercial con escaparates | 0,90 |

Figura 85. Recomendaciones de acera según *Instrucción de Vía Pública*, Ayuntamiento de Madrid.

La pendiente transversal y longitudinal será superior al 1 o 2 %, siendo el máximo de la pendiente longitudinal el 5 %. Es recomendable, siempre que el terreno lo permita, que el acabado superficial sea permeable.



Figura 86. Ejemplo de pavimento permeable.



Figura 87. Adoquines con junta abierta permeable.



Figura 88. Adoquines con grava en la junta.

Criterios en aparcamiento

El acabado superficial dependerá del uso, de la carga a soportar por el aparcamiento, de las condiciones climáticas y del terreno soporte (ver capítulo "Aparcamientos"). Se recomienda el uso de vegetación, grava contenida en celdas prefabricadas, adoquinado con junta abierta y hormigón poroso.

Es recomendable que la superficie del aparcamiento vierta hacia áreas de retención o infiltración del agua, e incluso hacia zonas de biorretención.

| Ancho de bandas de aparcamiento | | |
|---------------------------------|-----------------|------------|
| Tipo de banda | Recomendada (m) | Mínima (m) |
| En línea | 2,25 | 2,00 |
| En batería | 5,00 | 4,50 |
| En ángulo | 5,50 | 4,00 |

Figura 89. Recomendaciones en aparcamientos según *Instrucción de Vía Pública*, Ayuntamiento de Madrid.



Figura 90. Aparcamiento con pavimento permeable.

La pendiente transversal y longitudinal será superior al 1 o 2 %, siendo el máximo de la pendiente longitudinal el 5 %.

Criterios en calzada

La calzada debe tener una pendiente mínima transversal del 2 % desde el eje y, siempre que sea posible, un acabado superficial permeable. Las dimensiones recomendadas para la calzada son:

| Ancho de carril | |
|---------------------------------|-----------------|
| Tipo | Recomendado (m) |
| Vía metropolitana | 3,50-3,75 |
| Vía urbana | 3,50 |
| Vía de distrito | 3,50 |
| Vía colectora local residencial | 3,50 |
| Vía colectora local industrial | 3,75 |
| Vía local de acceso residencial | 3,00 |
| Vía local de acceso industrial | 3,75 |

Figura 91. Recomendaciones en calzada según *Instrucción de Vía Pública*, Ayuntamiento de Madrid.



Figura 92. Comparativa de permeabilidad de asfaltos.

Criterios en elementos auxiliares transitables

Se trata de elementos transitables por peatones o vehículos ligeros que no requieren resistencias elevadas, como el alcorque y la zona de paso en la mediana.

El alcorque permeable transitable

Está especialmente indicado para aceras o plazas inferiores a 1,5 m y permite la supresión de las diferencias de cota existentes en las áreas peatonales.

Acabado de alcorque permeable transitable

Acabado continuo

- Caucho
- Mortero drenante
- Grava estabilizada
- Terreno vegetal estabilizado en celdas drenantes
- Chapa metálica perforada
- Rejilla tipo tramex
- Pieza única prefabricada de hormigón

Acabado discontinuo

- Adoquín de hormigón con junta abierta
- Adoquín de hormigón poroso
- Adoquín cerámico con junta abierta
- Baldosa de hormigón con junta abierta
- Baldosa de hormigón poroso
- Baldosa plástica drenante
- Terreno vegetal estabilizado con piezas de hormigón
- Terreno vegetal estabilizado con piezas cerámicas
- Flotante con piezas cerámicas
- Flotante con piezas de madera
- Rejilla de fundición
- Rejilla de fundición con guarda árboles
- Pieza plástica de polietileno

tonales. Para favorecer la mejora de la gestión del agua y disminuir las necesidades de riego se recomienda:

- | Dirigir las pendientes de los pavimentos hacia los alcorques.
- | Incorporar el drenaje en el perímetro, como almacenamiento de agua suplementario.
- | Incorporar elementos de infiltración puntual vertical de pequeña escala en zonas con poca disponibilidad espacial.
- | Interconectar los alcorques creando una red de almacenamiento de agua secundaria.



Figura 93. Ejemplos de acabados en alcorques.

La zona de paso en la mediana

Es un espacio de espera para peatones en viales de grandes dimensiones y puede estar enrasada elevada o deprimida respecto al vial. Representan superficies donde se puede actuar para retener, infiltrar e incluso almacenar el agua de lluvia recogida del propio vial.

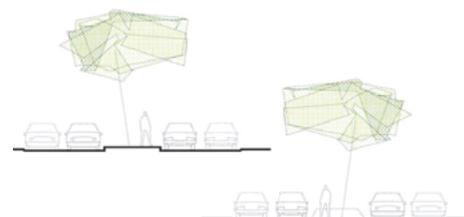


Figura 94. Ubicación de mediana respecto a la calzada en zona de paso elevado y a su misma cota.

El acabado de la zona de paso en mediana puede ser, entre otros:

Zona de paso en mediana

Acabado continuo

- Hormigón poroso
- Terrazo compacto permeable

Acabado discontinuo

- Adoquín de hormigón con junta abierta
- Adoquín cerámico con junta abierta
- Baldosa de hormigón con junta abierta
- Baldosa de hormigón poroso
- Baldosa plástica drenante
- Terreno vegetal estabilizado con piezas de hormigón
- Terreno vegetal estabilizado con piezas cerámicas

Criterios para elementos no transitables

Están presentes en vías de gran sección o en áreas de amplia superficie y permiten mejorar la capacidad de infiltración al terreno, como el alcorque, la franja de biorretención, la mediana y la rotonda.

El alcorque no transitable

Normalmente se encuentra en aceras o plazas de grandes dimensiones y no se recomienda el alcorque deprimido por generar riesgo de caídas.



Figura 95. Ejemplos de alcorques no transitables.

Acabado de alcorque no transitable

A cota de calle

- Elevado sobre la cota de la calle
- Protección con valla de forja
- Protección con valla de madera
- Protección con estaquillado de madera
- Protección con elementos de hormigón prefabricados
- Con marco prefabricado de hormigón
- Con marco metálico
- Con bordillo de adoquín cerámico
- Con bordillo de adoquín de hormigón
- Con mulch

Por encima de la cota de la calle

Macetero impermeable

- Pieza prefabricada de hormigón
- Piezas prefabricada de hormigón con junta sellada
- Hormigón in situ
- Pieza prefabricada metálica

Contención permeable

- Adoquín pétreo con junta abierta
- Pieza prefabricada metálica y base drenante

Al igual que en el alcorque transitable, se recomienda además:

- Dirigir las pendientes de los pavimentos hacia los alcorques.
- Incorporar el drenaje en el perímetro, como almacenamiento de agua suplementario.
- Incorporar elementos de infiltración puntual vertical de pequeña escala en zonas con poca disponibilidad espacial.
- Interconectar los alcorques creando una red de almacenamiento de agua secundaria.

La franja de biorretención no transitable

Su función principal es la depuración y la infiltración del agua de lluvia recibida desde su entorno. Su ubicación varía en función del

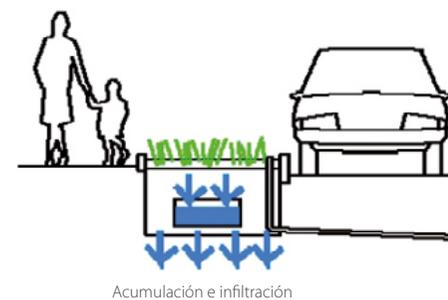
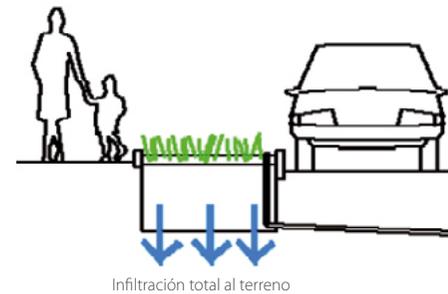


Figura 96. Esquema de las distintas funciones de la franja de biorretención.

tipo de vía, pero habitualmente se dispone entre la calzada y la acera, sirviendo además de protección para el peatón.

Existen sistemas prefabricados que permiten una rápida instalación en obra y la captación directa del agua de escorrentía de la vía urbana contigua.



Figura 97. Alcorques con franjas de biorretención.



Figura 98. Alcorque conectado a la red.



Figura 99. Sistema prefabricado de biorretención.

La mediana no transitable

Separa a los peatones y los vehículos, mejorando la seguridad del tráfico y el aspecto paisajístico y ambiental. La mediana puede ser elevada, enrasada o deprimida.

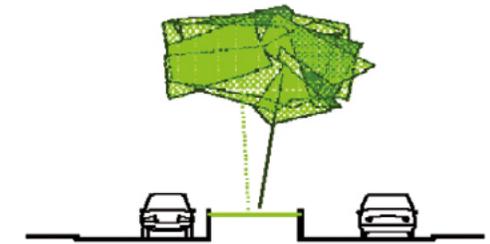


Figura 100. Esquema de mediana elevada.

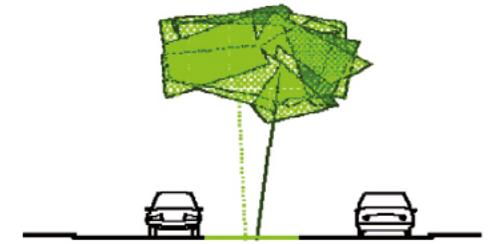


Figura 101. Esquema de mediana enrasada.

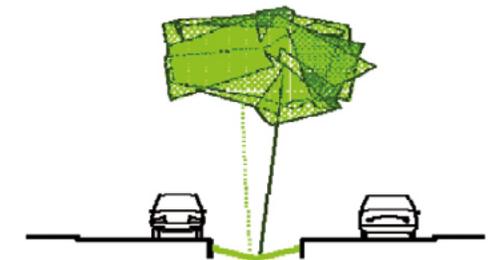


Figura 102. Esquema de mediana deprimida.

| Ancho de mediana recomendado | | |
|-------------------------------------------------|-----------------|------------|
| Tipo | Recomendada (m) | Mínima (m) |
| Vía metropolitana en suelo no urbanizable | 3,00 | 1,00 |
| Vía metropolitana en suelo urbano y urbanizable | 6,00 | 3,00 |
| Vía no metropolitana | | 1,50 |
| Protección de giros a la izquierda | 5,00 | 3,00 |
| Tránsito peatonal | 10,00 | 6,00 |
| Refugio al cruce de peatones | 3,00 | 1,20 |

Figura 103. Recomendaciones en el ancho de mediana según *Instrucción de Vía Pública*, Ayuntamiento de Madrid.

Permite mantener la permeabilidad de una parte importante del terreno urbanizado e incluso incorporar medidas que favorezcan la acumulación, la retención y la conducción a otras áreas con mayor capacidad. La incorporación de vegetación aumenta la capacidad de retención de agua y mitiga el fenómeno de “isla de calor”.



Figura 105. Mediana vegetada permeable para el tranvía.

Se recomienda utilizar riego por goteo en la mediana vegetada, incluyendo geotextiles y mantas para retener la humedad.



Figura 104. Mediana no transitable con vegetación.

La rotonda

Puede ser elevada respecto la cota de calzada, enrasada o a cota inferior. El diseño de la rotonda debe adaptarse al terreno soporte, la topografía y a las condiciones climáticas. En todo caso, se recomienda que la rotonda sea un elemento de recogida del agua de lluvia de las zonas adyacentes, evitando el acabado impermeable y potenciando la presencia de vegetación autóctona (respetando la seguridad y visibilidad).

Acabados de rotonda

- Terreno vegetal
- Terreno vegetal con estabilizantes
- Terreno vegetal estabilizado con celdas drenantes
- Tepe con manta drenante
- Grava contenida en celdas drenantes
- Caucho
- Grava estabilizada con resinas
- Fuente
- Lámina de agua

La incorporación de fuentes (en circuitos cerrados y agua no potable) favorecerá el enfriamiento evaporativo, mitigando el efecto de “isla de calor” en el entorno. La lámina de agua debe contar con bombas de oxigenación y recirculación para evitar el estancamiento y eutrofización.

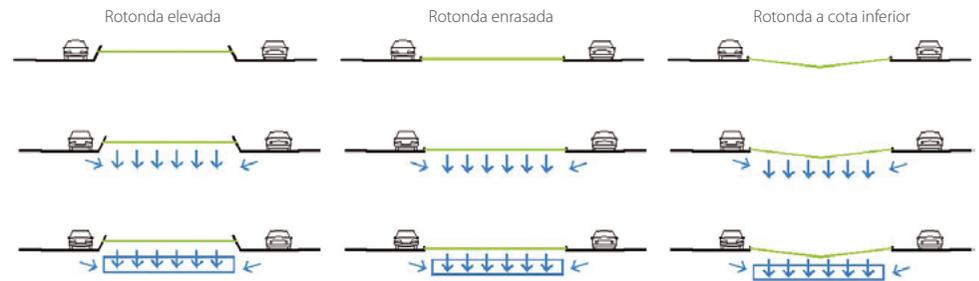


Figura 106. Estrategias de gestión del agua de lluvia: filtración y filtración con acumulación.



Figura 107. Modificación para el almacenamiento.



Figura 108. Materiales porosos en rotonda.

La zona de juego

Es recomendable incorporar acabados que amortigüen la escorrentía urbana y permitan la infiltración:

| Acabado de zona de juego | |
|--------------------------|---------------------------------------|
| Vegetación autóctona | Acabado continuo |
| | Mulch |
| | Caucho |
| | Arena |
| | Terreno vegetal |
| | Hormigón poroso |
| | Acabado discontinuo |
| | Adoquín de hormigón con junta abierta |
| | Loseta de caucho |



Figura 109. Zona de juegos infantiles.

El parterre

Es un espacio vegetal cercado con acceso exclusivo para su mantenimiento y puede transformarse en un área de acumulación temporal o permanente de agua. Las opciones de acabados y vegetación son tan libres como el terreno y la climatología del lugar lo permitan.



Figura 110. Caballones colindantes.

El caballón

En combinación con sistemas de riego por goteo permite reducir notablemente las necesidades hídricas. Se recomienda interconectar los caballones puntuales para favorecer la circulación del agua.

Para mantener la humedad y evitar su evaporación es recomendable incorporar vegetación de bajo porte o mulches orgánicos.

La terraza o el bancal vegetado

En terrenos con pendiente elevada son aconsejables los aterrazados o banales porque disminuyen la velocidad de escorrentía y favorecen la infiltración pausada del agua al terreno.



Figura 111. Terraza vegetada en Marvão, Portugal.

La zona puntual de infiltración

Actúa como un pequeño regulador del cauce de la escorrentía en episodios de lluvia, además de ser zonas de valor paisajístico y medioambiental en el entorno urbano. Además, se puede recurrir a infiltradores puntuales, incluso interconectados para la optimización del sistema.

Las redes o canalizaciones

Las redes o canalizaciones de pluviales también pueden ser permeables si el terreno lo permite, permitiendo la infiltración. Se recomienda transportar el agua mediante drenes filtrantes o zanjas filtrantes.

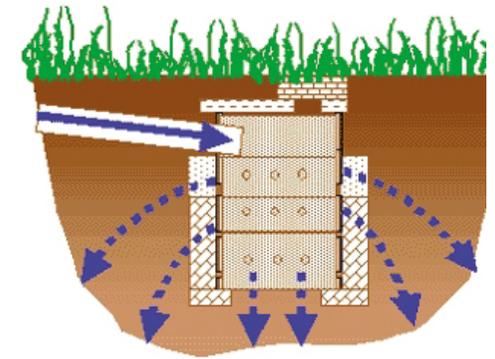


Figura 112. Esquema de infiltración puntual.

4.4. Ejemplo representativo

En una sección de calle de ancho medio en Zona A y terreno permeable se analizan las mejoras para la gestión del agua y se proponen las siguientes soluciones:

La acera

Se plantean dos variantes:

- | El acabado superficial permeable con recogida de agua subsuperficial y pendiente transversal del 2 % orientada hacia las franjas de biorretención. Se recomienda un acabado de baldosa de hormigón con junta abierta sobre una cama de arena entre 5 y 10 cm de espesor, una lámina geotextil, base de zahorra sobre el terreno compactado y tubo-dren poroso, que permita la infiltración del agua durante el transporte.
- | El acabado superficial permeable con recogida de agua superficial mediante una rejilla lineal integrada en el acabado y pendiente transver-

sal del 2 % orientada hacia la rejilla. Se recomienda un acabado con adoquín de hormigón de 8 cm de espesor con junta abierta y rejilla en "T" invertida para la captación y la conducción del excedente de agua. El pavimento se asienta sobre una cama de arena entre 5 y 10 cm de espesor, una lámina geotextil sobre el terreno compactado. La rejilla verterá a una canaleta de polipropileno perforada para favorecer la infiltración al terreno.

El vial

Para el acabado del vial se recomienda un asfalto permeable sobre base granular y con una conducción subsuperficial del agua captada.

El aparcamiento

En el aparcamiento se recomienda un acabado con adoquín de hormigón con junta abierta sobre una cama de arena de entre 5 y 10 cm de espesor, una lámina de geotextil y base de

zahorra sobre el terreno compactado. La pendiente del aparcamiento se dirige hacia las aceras, donde se interponen biofiltros de arena. El agua que atraviesa estos biofiltros es infiltrada al terreno y el exceso conducido a los jardines de biorretención.

La mediana

Se aprovecha como área de infiltración y acumulación del agua de lluvia. Para ello, se recomienda incluir vegetación combinada con sistemas de acumulación puntual. La vegetación debe ser autóctona, combinando tapizante con especies de gran porte. Bajo la capa de terreno vegetal se dispone una franja de grava de un metro de espesor, en la que se intercalan elementos puntuales prefabricados (celdas de drenaje y celdas de acumulación envueltas en una lámina geotextil antirraíces) entre las áreas rizomáticas de las especies de gran porte. Se dispone además de rebosaderos que eviten la

saturación del sistema, derivando los excesos hacia la red pluvial general.

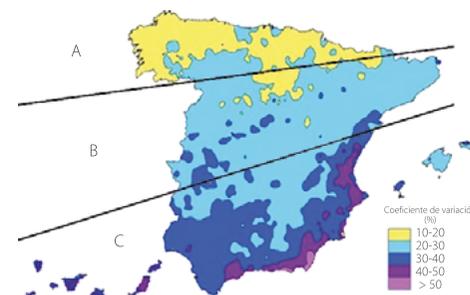
El jardín de biorretención

El jardín de biorretención recibe el agua de lluvia captada de las bajantes de pluviales procedente del edificio y de las áreas pavimentadas, que llegan a una arqueta principal a través de un colector perforado.

Se compone de una lámina geotextil antirraíces que envuelve el volumen de las distintas capas: el terreno vegetal en el que crecen diferentes especies autóctonas, arena, una lámina geotextil antirraíces y las celdas drenantes planas envueltas también en geotextil. Se recomienda incluir un rebosadero conectado a la red de pluviales general.

| | Precipitaciones (mm) | | | |
|--------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| | Precipitación media (mensual) | Precipitación media (anual) | Precipitación máxima | Precipitación mínima |
| Zona A | 79,14 | 949,72 | 357,86 | 0,50 |
| Zona B | 37,47 | 449,58 | 221,89 | 0,00 |
| Zona C | 32,92 | 395,05 | 304,64 | 0,00 |

Figura 113. División geográfica según la variación de la precipitación.





El alcorque transitable sobre sistema de biorretención

Alcorque de fundición en anillos, modificable con el crecimiento de árbol, que permite el paso de agua y el tránsito seguro de los peatones.

El jardín colector de pluviales en el encuentro con la fachada

Es una zona vegetal junto a los edificios, formada por una lámina impermeabilizante en contacto con el muro y con celdas drenantes envueltas en una lámina geotextil –dispuestas en vertical a modo de cámara bufa–. El jardín debe apoyarse en un lecho de grava envuelto en una lámina geotextil.

Se recomienda poner especial cuidado en el encuentro con la edificación para evitar humedades por capilaridad o filtración, utilizar especies tapizantes y de bajo porte e incorporar un rebosadero conectado a la red general de pluviales.

Figura 114. Detalle de la sección y la planta de una calle tipo de ancho medio.

Estimación del coste orientativo para una franja de calle de 5 metros de ancho por metro lineal de acera:

| Material | Dimensiones | Precio unitario | Unidad | Precio orientativo |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------|------------------|------------------------|
| Recogida de agua pluvial en cubierta (56,76 €/m²) | | | | Total: 293,81 € |
| Canalón de aluminio Red. D250 mm p.p. piezas | 5 | 11,00 | €/ml | 55,00 € |
| Arqueta registrable prefabricada de hormigón 40 x 40 x 50 cm | 1 | 77,08 | €/ud | 77,08 € |
| Bajante de aluminio lacado 100 mm | 9 | 17,97 | €/ml | 161,73 € |
| Acera de baldosa de hormigón poroso (31,48 €/m²) | | | | Total: 472,34 € |
| Baldosa de hormigón poroso | 5 3 | 6,50 | €/m ² | 81,25 € |
| Arena de río | 5 3 0,1 | 23,00 | €/m ³ | 28,75 € |
| Bajante de aluminio lacado de 100 mm | 9 | 17,97 | €/ml | 161,73 € |
| Grava 80/220 mm | 5 3 0,3 | 23,31 | €/m ³ | 87,04 € |
| Tubo de bóveda ranurado en PVC con pared simple de 110 mm | 2,4 | 2,32 | €/ml | 5,57 € |
| Terreno compactado | 5 3 | 8,16 | €/m ² | 102,00 € |
| Lámina geotextil antirraíces | 5 3 | 0,48 | €/m ² | 6,00 € |
| Aparcamiento de adoquín con junta abierta. Plaza de 5 x 2 m (25,44 €/m²) | | | | Total: 254,43 € |
| Bordillo prefabricado de hormigón | 5 | 6,22 | €/ml | 31,10 € |
| Adoquín de 10 cm altura | 5 2 | 12,56 | €/m ² | 125,60 € |
| Arena de río | 5 2 0,1 | 23,00 | €/m ³ | 23,00 € |
| Lámina de geotextil antirraíces | 5 2 | 0,48 | €/m ² | 4,80 € |
| Grava de 80/220 mm | 5 2 0,3 | 23,31 | €/m ³ | 69,93 € |
| Jardín de biorretención y recepción de agua de cubiertas (31,01 €/m²) | | | | Total: 775,48 € |
| Bordillo prefabricado de hormigón | 5 | 6,22 | €/ml | 31,10 € |
| Tubería de rebosadero en PVC de 75 mm | 3,2 | 4,56 | €/ml | 14,59 € |
| Arqueta prefabricada de PVC 40 x 40 cm | 1 | 117,79 | €/ud | 117,79 € |
| Tierra vegetal | 5 5 0,1 | 10 | €/m ³ | 25,00 € |
| Lámina de geotextil | 5 5 | 0,48 | €/m ² | 12,00 € |
| Arena de río | 5 5 0,5 | 23 | €/m ³ | 287,5 € |
| Celdas drenantes de 52 x 260 x 475 mm | 5 5 | 11,50 | €/m ² | 287,5 € |

| Material | Dimensiones | Precio unitario | Unidad | Precio orientativo |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------|------------------|--------------------------|
| Asfalto permeable (16,89 €/m²) | | | | Total: 337,82 € |
| Bordillo prefabricado de hormigón | 10 | 6,22 | €/ml | 62,20 € |
| Mezcla bituminosa BM-3a | 5 4 | 3,30 | €/m ² | 66,00 € |
| Grava de 80/220 mm | 5 4 0,1 | 23,31 | €/m ³ | 46,42 € |
| Terreno compactado | 5 4 | 8,16 | €/m ² | 163,20 € |
| Mediana filtrante y celdas de acumulación (91,78 €/m²) | | | | Total: 925,77 € |
| Tubería de rebosadero de PVC 75 mm | 4,5 | 4,56 | €/ml | 20,52 € |
| Bordillo prefabricado de hormigón | 5 | 6,22 | €/ml | 31,10 € |
| Tierra vegetal | 5 3 0,2 | 10 | €/m ³ | 30,00 € |
| Grava de 80/220 mm | 5 3 1,30 | 23,31 | €/m ³ | 452,60 € |
| Lámina de geotextil | 5 7 | 0,48 | €/m ² | 16,80 € |
| Arena de río | 5 1 | 23 | €/m ³ | 74,75 € |
| Celda de acumulación | 5 1 1 | 120,00 | €/m ³ | 300,00 € |
| Jardín de biorretención y alcorque permeable (45,93 €/m²) | | | | Total: 1.140,38 € |
| Rejilla de fundición | 1 | 98,00 | €/ud | 98,00 € |
| Tubería de rebosadero de PVC de 75 mm | 5,8 | 4,56 | €/ml | 26,22 € |
| Bordillo prefabricado de hormigón | 5 | 6,22 | €/ml | 31,10 € |
| Arena de río | 5 4 | 0,48 | €/m ³ | 402,50 € |
| Alcorque transitable 120 x 120 mm | 1 | 582,56 | €/ud | 582,56 € |
| Pavimento cerámico con junta abierta y zanja drenante (38,31 €/m²) | | | | Total: 574,76 € |
| Adoquín de 10 cm altura | 5 3 | 17,70 | €/m ² | 265,50 € |
| Arena de río | 5 3 0,1 | 23,00 | €/m ³ | 34,50 € |
| Terreno compactado | 5 3 | 8,16 | €/m ² | 122,40 € |
| Grava de 80/220 mm | 5 3 0,40 | 23,31 | €/m ³ | 139,86 € |
| Pletina de acero de 10 cm | 10 | 0,53 | €/ml | 5,30 € |
| Lámina de geotextil | 5 3 | 0,48 | €/m ² | 7,20 € |
| Jardín de biorretención junto a la fachada (69,22 €/m²) | | | | Total: 346,12 € |
| Bordillo prefabricado de hormigón | 5 | 6,22 | €/ml | 31,10 € |
| Tierra vegetal | 5 1 0,1 | 10 | €/m ³ | 6,00 € |
| Lámina impermeabilizante de oxiasfalto | 5 2 | 2,45 | €/m ² | 24,5 € |
| Grava de 80/220 mm | 5 1 0,60 | 23,31 | €/m ³ | 69,93 € |
| Arqueta prefabricada de PVC de 40 x 40 cm | 1 | 117,79 | €/ud | 117,79 € |
| Celdas drenantes de 52 x 260 x 475 mm y lámina de geotextil | 5 2 | 11,98 | €/m ² | 96,80 € |

4.5. Ficha comparativa

Plaza de 2.500 m² con una zona peatonal de 1.500 m² y un parterre de césped de 1.000 m² en Zona climática C con una precipitación media anual de 395 mm.

| | Características de la instalación | Gestión y aprovechamiento del agua | Impacto ambiental |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>INSTALACIÓN ESTÁNDAR</p>  | <ul style="list-style-type: none"> – Pavimento impermeable. – Césped en parterre elevado y riego (1.000 l/m² año). | <p>Estimación de gastos anuales asociados:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Vertido a la red de saneamiento desde la zona peatonal impermeable: 379 €/año*. (1.500 m² × 0,8 escorrentía × 398 mm/año × 0,8 €/m³) – Vertido a la red de saneamiento desde el parterre: 158 €/año* – Riego en el parterre de césped: 1.570 €/año* (1.000 m² × 365 días × 1.000 ml/m² año × 1.57 €/m³) <p>Total: 2.107 €/anuales.</p> | <ul style="list-style-type: none"> – Nula amortiguación de la escorrentía. – Elevado coeficiente de escorrentía en superficie impermeable y notables variaciones de la temperatura por el acabado superficial (efecto “isla de calor”). – Ausencia de aprovechamiento, almacenamiento e infiltración de agua. – Riesgo de elevadas concentraciones puntuales de agua en la red general de saneamiento. |
| <p>CON APROVECHAMIENTO DE AGUA</p>  | <ul style="list-style-type: none"> – Pavimento permeable. – Parterre deprimido para recoger el agua de la escorrentía para su recepción e infiltración. – Depósito enterrado de 100 m³ para la acumulación del agua de escorrentía para su uso en el riego y el baldeo de las zonas adyacentes. | <p>Costes y ahorros estimados:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Depósito almacenamiento: 16.000 € (coste estimado) – Ahorro en el riego del parterre: 1.570 €/año* (riego desde depósito, sin consumo de red) – Ahorro por no depuración: 537 €/año* – Ahorro total anual: 2.107 € anuales – Periodo de retorno de la inversión: 7,5 años | <ul style="list-style-type: none"> – Amortiguación del vertido a la red por ralentización, infiltración y almacenamiento del agua de escorrentía. – Disminución del mantenimiento y mejora ambiental del entorno. – Reducción de gasto de riego. – Reutilización de agua para baldeo y riego. |

* Importe saneamiento y abastecimiento conforme a tarifas del agua (AEAS).

5. Cubiertas y fachadas vegetales

Las cubiertas y fachadas son la primera superficie receptora del agua de lluvia en la edificación y representan una oportunidad única para restaurar el ciclo natural del agua.

En los entornos urbanos, la ausencia de vegetación y el uso generalizado de superficies impermeables (asfalto y hormigón) genera problemas ambientales. El suelo urbano es además un bien escaso y preciado, por lo que se tiende a su total ocupación.

Un edificio que cuenta con una cubierta o fachada vegetal, parcial o totalmente revestida de vegetación, recupera parte de la infiltración al terreno, la capacidad depuradora del suelo y la capacidad de evapotranspiración de la vegetación y de los circuitos hídricos preexistentes.



Figura 115. Fachada vegetada en Madrid.

5.1. Justificación

Las ventajas por la utilización de cubiertas y fachadas vegetales son:

- | La retención de agua.
- | La creación de hábitats y la mejora ambiental y estética del entorno.
- | El aislamiento térmico y la reducción de las pérdidas energéticas.
- | La captura de polvo y de otros elementos en suspensión.
- | El aislamiento acústico.
- | La captación de dióxido de carbono (CO₂).
- | La protección de los componentes de la cubierta.
- | La producción de alimentos en huertos urbanos.
- | La reducción del efecto "isla de calor".
- | La regulación de la humedad.

La retención de agua

La cubierta vegetal es la primera superficie de contacto con el agua de lluvia. El agua que se almacena en el sustrato es absorbida por las plantas y devuelta a la atmósfera mediante la evapotranspiración. En verano, dependiendo de las especies y de la profundidad del sustrato, la cubierta vegetal puede retener entre el 70 y el 90 % de las precipitaciones que recibe. En invierno, retiene entre un 25 y 40 %. De esta forma se disminuye el caudal pico de vertido a la red de saneamiento o el alcantarillado, con un retardo de vertido que puede alcanzar las doce horas.

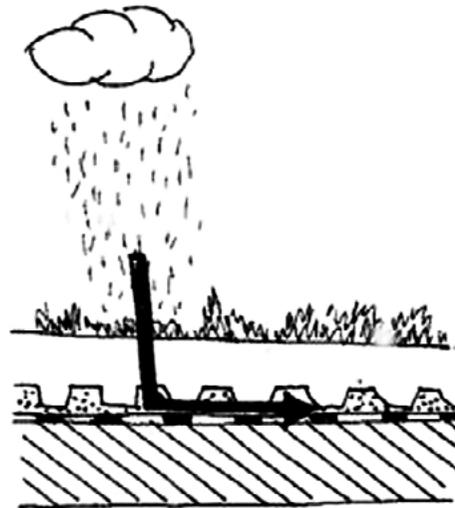


Figura 116. Cubierta vegetal con retención de agua.

La creación de hábitats y la mejora ambiental y estética del entorno

La incorporación de cubiertas y fachadas vegetales permite recuperar parte de la biodiversidad perdida. En los casos en los que el sustrato es profundo y no transitable se convierten en pequeños hábitats donde las plantas crecen sin ser dañadas, las aves pueden anidar en el suelo y los insectos proliferan.

El aislamiento térmico y la reducción de las pérdidas energéticas

Las cubiertas vegetales aíslan los edificios evitando la exposición directa de la cubierta



Figura 117. Cubierta del Museo de la Academia de Ciencias de California.

y añaden sombra de protección. El aire encerrado en el sustrato y entre las plantas actúa como aislamiento. Gracias a la cubierta vegetal una parte de la radiación solar es reflejada, reduciendo la cantidad que penetra en el edificio.

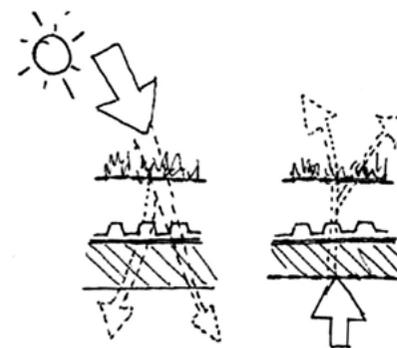


Figura 118. Mejora del aislamiento térmico.

La cubierta vegetal reduce el calentamiento interno en verano y la pérdida de calor en invierno, disminuyendo la demanda energética por climatización y mejorando la durabilidad de los materiales de impermeabilización y aislamiento.

En un día caluroso la temperatura de una cubierta de grava puede oscilar entre 25 y 70 °C, mientras que con una cubierta vegetal la temperatura no subirá por encima de 25 °C. Una vivienda unifamiliar tipo con una cubierta vegetal de 10 cm ahorra hasta un 10 % en el consumo por aire acondicionado.

En definitiva, el uso de la cubierta vegetal reduce significativamente la demanda energética de un edificio.

La captura de polvo y de otros elementos en suspensión

La cubierta vegetal filtra el aire, atrapa el polvo que se encuentra en la atmósfera y –con la lluvia– lo retiene y procesa en el suelo. Un metro cuadrado de superficie vegetal puede eliminar hasta 2 kg de partículas de polvo del aire al año.

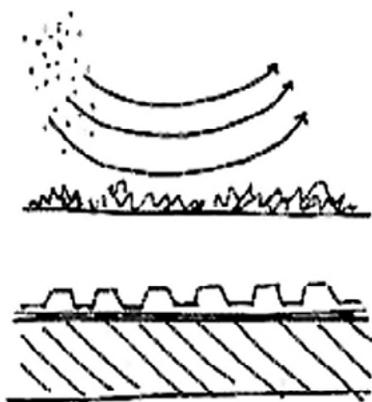


Figura 119. Captura de polvo.

El aislamiento acústico

El sustrato, las plantas y el resto de elementos que componen la cubierta vegetal favorecen el aislamiento acústico. Las ondas de sonido producidas por maquinaria, tráfico o aviones pueden ser absorbidas, reflejadas o desviadas. El sustrato tiende a bloquear bajas frecuencias de onda; la vegetación las altas frecuencias.

Una cubierta vegetal con 12 cm de sustrato puede reducir el sonido en 40 decibelios y con 8 cm más de sustrato se pueden alcanzar reducciones hasta de 50 decibelios.

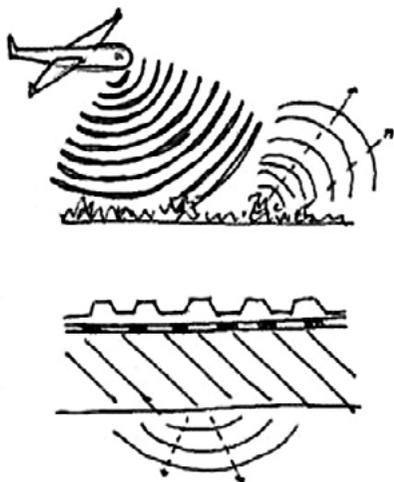


Figura 120. Aislamiento acústico.

La captación de dióxido de carbono (CO₂)

La vegetación convierte el CO₂, el agua y la luz solar en oxígeno y glucosa mediante la fotosíntesis. Una cubierta vegetal de especies her-

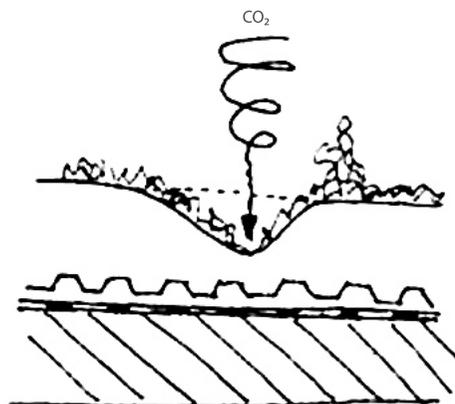


Figura 121. Sumidero de CO₂.

báceas tipo Sedum con un sustrato inferior a 15 cm puede fijar 375 gramos de carbono por metro cuadrado. Si en la ciudad de Detroit se cubriesen todas las cubiertas de sus edificios con plantas tipo Sedum, se conseguiría una reducción de CO₂ equivalente a retirar de sus calles diez mil vehículos todoterreno al año, además de mejorar la eficiencia energética de la edificación y reducir sus emisiones.

La protección de los componentes de la cubierta

La cubierta vegetal consigue una protección óptima del impermeabilizante y de los demás componentes de la cubierta, prolongando notablemente su durabilidad y reduciendo los gastos derivados de mantenimiento y de sustitución de los elementos dañados.

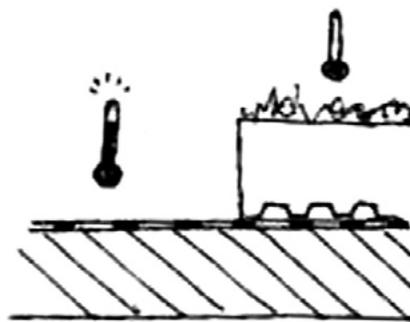


Figura 122. Protección de los componentes de cubierta.

La producción de alimentos en huertos urbanos

Los huertos urbanos situados en las azoteas de las ciudades representan actualmente un

movimiento en auge. Para su creación existen dos opciones: la plantación sobre la cubierta con un sustrato de 40 a 60 cm de espesor o la plantación en maceteros más o menos elevados con un sustrato.

En ambos casos las necesidades hídricas de estos cultivos son elevadas y es necesario emplear un sustrato orgánico rico en nutrientes, pudiéndose reutilizar el compost producido en el propio huerto.

Algunos casos representativos son: el huerto urbano Brooklyn Grange en Nueva York, que ocupa 3.700 m² en las azoteas de la zona urbana de Northern Boulevard; el huerto urbano de San Petersburgo, en el que las hortalizas cultivadas contienen menos metales pesados que las comercializadas y el Restaurante Uncommonground de Chicago, que cultiva en la cubierta sus propios vegetales.

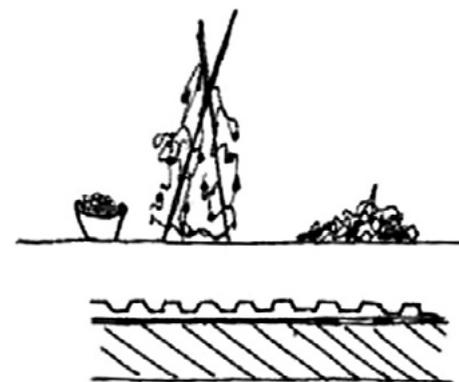


Figura 123. Producción de alimentos.



Figura 124. Huerto urbano en Brooklyn, EEUU.



Figura 126. Mercado de San Antón, Madrid.



Figura 125. Restaurante Uncommonground en Chicago.



Figura 127. Huerting Callao, Madrid.

La reducción del efecto “isla de calor”

La cubierta verde modera el efecto urbano de la isla de calor. A través de la evapotranspiración, la vegetación refresca el entorno en los meses de verano, absorbiendo calor al evaporar agua (cerca de 592 Kcal por litro de agua). Un metro cuadrado de vegetación puede evaporar más de medio litro de agua en un día caluroso y hasta 700 litros de agua anuales.

La regulación de la humedad

En condiciones de aire seco, la vegetación evapora parte del agua que tiene almacenada, elevando la humedad relativa del aire. En condiciones de aire húmedo, la vegetación propicia la condensación de agua, produciendo rocío y reduciendo la humedad relativa del aire.

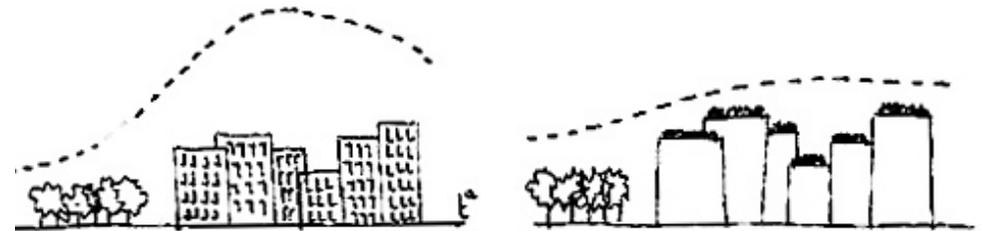


Figura 128. Esquema reducción efecto isla de calor en ciudades por cubierta vegetal.

5.2. Condicionantes de diseño

Para el correcto diseño de una cubierta vegetal se debe tener en cuenta:

- | La densidad de la vegetación.
- | La inclinación de la cubierta.
- | El tipo de ajardinamiento.
- | El peso de la cubierta.
- | La altura, localización y orientación de la cubierta.
- | La accesibilidad a la cubierta.
- | El desagüe de pluviales.

La densidad de la vegetación

Cuanto mayor sea la densidad vegetal, mayores beneficios obtendremos. En la tabla siguiente se recoge el valor de la superficie de hoja en función del tipo de especie vegetal.

| Superficie de hoja de diferentes formas de vegetación | | |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------|
| Vegetación | Superficie de hoja en un m ² de cubierta | |
| Césped | 3 cm de altura | 6 m ² |
| | 5 cm de altura | 9 m ² |
| Pradera con pastos hasta 60 cm de altura | Hasta 225 m ² | |
| Techo de pasto en verano | Más de 100 m ² | |
| Sedum hasta 8 cm de altura | 1 m ² | |
| Sedum denso hasta 10 cm de altura | 2,4 m ² | |
| Vid silvestre en fachada | 10 cm de espesor | 3 m ² |
| | 20 cm de espesor | 5 m ² |
| Hiedra en fachada de 25 cm de espesor | 11,8 m ² | |

La inclinación de la cubierta

Para cubiertas planas de hasta un 5 % de pendiente se recomienda el uso de un sistema de drenaje que evite el encharcamiento de las raíces. En inclinaciones superiores al 40 % se deben incorporar elementos auxiliares que eviten la pérdida del sustrato por deslizamiento.

El tipo de ajardinamiento

El jardín de cubierta. El mantenimiento de este tipo de cubierta es intensivo y precisa de un sustrato mayor de 20 cm de espesor. Su coste económico es elevado, permite gran variedad de plantaciones y es exclusivo de las cubiertas planas.

La cubierta vegetal extensiva. Se da en cubiertas planas e inclinadas. La vegetación utilizada es sencilla –habitualmente Sedum–, llegando a crecer sin apenas mantenimiento y riego. Precisa poco sustrato, por lo que supone baja sobrecarga en la estructura de la edificación.

El huerto urbano. Es un espacio de cultivo cuyo rendimiento productivo es menor que el huerto tradicional debido a su mayor exposición al viento, las variaciones de temperatura y la humedad.

La altura, localización y orientación de la cubierta

La incidencia del viento y la radiación solar influyen en la evaporación, representando un condicionante a la hora de seleccionar las especies vegetales apropiadas.

La altura de los edificios aumenta la incidencia del viento y la pérdida de agua por evaporación en las plantas, la orientación de las fachadas afecta a la necesidad de riego debido a la mayor o menor incidencia del sol y, por tanto, a la selección de la especie en función de su necesidad hídrica.

La accesibilidad a la cubierta

En cubiertas extensivas el acceso debe estar restringido a las tareas de mantenimiento. En cubiertas intensivas se recomienda incluir zonas de acceso peatonal o rodado con pavimentos adecuados en caminos y terrazas, y con paramentos verticales que protejan de las caídas.

El desagüe de pluviales

La recogida de agua de pluviales puede reducirse notablemente gracias a la capacidad de retención de agua de la cubierta vegetal. En cubiertas extensivas con menos de 10 cm de sustrato la cantidad desaguada es del 50 %, mientras que en cubiertas intensivas y extensivas con más de 10 cm de sustrato se desagua el 30 % de la lluvia recibida.

| Cantidad de sustrato | Peso (kg/m ²) |
|--------------------------------|------------------------------------------------|
| > 20 cm de sustrato (22-27 cm) | Peso seco: 220-800 Peso saturado: 300-1.100 |
| < 20 cm de sustrato (10-13 cm) | Peso seco: 70-80 Peso saturado: 110-115 |

El peso de la cubierta

La cubierta vegetal implica una sobrecarga en la estructura del edificio que habrá que tener en cuenta al realizar obras de rehabilitación, garantizando el cumplimiento de las condiciones de estabilidad marcadas por la normativa vigente en el *Código Técnico de la Edificación*.

5.3. Elementos configuradores

La cubierta vegetal

Los principales elementos configuradores de una cubierta vegetal son:

| **El soporte estructural de cubierta.** La cubierta vegetal implica sobrecarga en la estructura original del edificio por lo que debe comprobarse si dicho incremento de peso es asumible por la estructura existente.

| **La lámina impermeabilizante con antirraíz.** Es el elemento encargado de asegurar la hermeticidad de la cubierta. En cubiertas vegetales, la lámina impermeabilizante debe ser siempre antirraíces, especialmente en cubiertas inclinadas. En caso contrario, se recomienda colocar una lámina antirraíces sobre la lámina impermeabilizante; además, en las láminas bituminosas se debe prestar especial atención a las zonas de solape.

| **El aislamiento térmico.** Se recomienda colocar el aislante en la cara más externa del forjado y cuando el aislamiento existente no sea suficiente, se suplementará con una capa de aislamiento térmico, preferentemente de poliestireno extrusionado (XPS), sobre la lámina impermeabilizante.

| **La lámina separadora, antideslizante o protectora.** Protege la impermeabilización de la cubierta de los esfuerzos de tracción y de

corte. Si se tiene como impermeabilizante un material químicamente intolerable como una lámina de PVC sobre betún, se debe colocar una lámina separadora neutra entre ambos elementos. En cubiertas invertidas no se deben emplear láminas separadoras sobre aislante, ya que se produciría condensación. La



Figura 129. Lámina separadora.

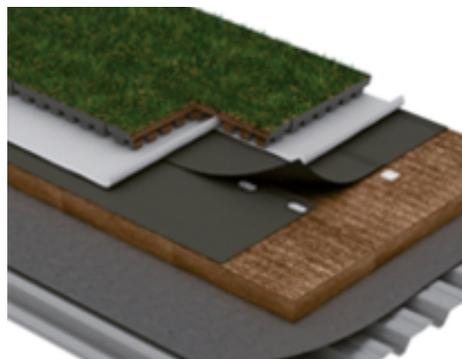


Figura 130. Elementos configuradores.

lámina puede ser de polietileno o de polipropileno, con espesores desde 0,2 a 2,5 mm, y habitualmente se comercializa en rollo.

| **La lámina antirraíz.** Protege la impermeabilización de la cubierta frente a la penetración de las raíces. Su colocación en impermeabi-



Figura 131. Manta retenedora de agua.



Figura 132. Sistema de drenaje por celdas plásticas.

lizante bituminoso es indispensable y debe ser compatible químicamente. Puede ser de poliolefina flexible (FPO), soldable con aire caliente, o de polietileno (PE), colocada suelta, con solapes de 150 cm. Se comercializa en rollo.

| **El retenedor de agua.** La manta retenedora captura el agua y los nutrientes, protege la lámina antirraíces y la lámina impermeabilizante de daños mecánicos y aporta aislamiento y amortiguación acústica. Generalmente se fabrica con fibras sintéticas de polipropileno o poliéster. Es termorresistente, compatible con materiales bituminosos, químicamente neutra y resistente al desgarramiento. Se recomienda colocarla con solapes de 10 cm, e incluso en capas dobles, aumentando así su efecto protector y retenedor. El espesor oscila entre 3 y 20 mm y su capacidad de retención de agua varía entre 3 y 12 l/m², según espesor. Se comercializa en rollo.

| **El sistema de drenaje.** La capa drenante crea una cámara de aire por donde se evacua el agua de cubierta; es un elemento indispensable para evitar problemas de hongos y pudrición en las raíces. Los sistemas recomendados para conseguir el drenaje son:

| **El sistema monocapa.** Está formado habitualmente por materiales porosos y livia-

nos de poro abierto, arcillas expandidas de granos gruesos, pizarra expandida o lava expandida. Se recomienda separarlo del sustrato mediante una lámina geotextil que evita la pérdida de finos. En capas de sustrato de 15 cm de espesor, se debe colocar una capa superior con 1/3 del volumen de material poroso y una capa inferior con 2/3 del volumen de material poroso.

| **El sistema prefabricado.** Está formado por elementos de polietileno reciclado que retienen el agua en concavidades, drenando el agua excedente por las perforaciones situadas en las partes altas del elemento. Se puede emplear tanto en cubiertas planas como inclinadas, con pequeñas variaciones en su diseño. Se comercializa tanto en



Figura 133. Plot regulable de polipropileno.

placa como en rollo, el espesor varía entre 25 y 60 mm y la capacidad de retención entre 10 y 27 l/m².

| **El plot regulable bajo pavimento flotante.**

Es un elemento de polipropileno regulable en altura que separa la zona de almacenamiento de agua de la cubierta vegetal quedando el riego garantizado a través de las mechas de conexión.

| **La lámina de geotextil.**

Es un filtro que evita la pérdida de sustrato y cubre el sistema de drenaje. Se fabrica en polipropileno o polietileno y se comercializa en rollo.

| **El sustrato.**

Es la capa soporte de la vegetación que sirve como material nutriente y de almacén de agua y oxígeno. Depende del tipo de vegetación a implantar y debe controlarse su acidez y el contenido en nutrientes. Su peso es uno de los principales condicionantes de diseño y su espesor puede reducirse hasta los 7 cm utilizando la vegetación adecuada. En la composición del sustrato se recomienda que el contenido en arcillas y limos sea menor al 20 % e incorporar entre el 25 y 75 % de material liviano (de mayor granulometría que el propio sustrato) como la piedra pómez, la arcilla expandida o la lava que aligere su peso y asegure una mejor oxigenación de las raíces.

Las empresas especializadas cuentan con sustratos preparados adecuados a cada tipo de vegetación. Es recomendable también un

sobresustrato que protege el sustrato del sol, evita que crezcan malas hierbas y mejora la captación de agua de rocío durante la noche, principal fuente de agua de la cubierta vegetal. Para el sobresustrato se recomienda utilizar grava volcánica, mulch, corteza de pino o grava de cuarzo.

| **El sustrato mineral.**

Es de grano grueso y se emplea como relleno de los elementos de drenaje en los sistemas monocapa o mezclado con el sustrato para aligerar el peso y aportar aire.

| **La vegetación.**

Se recomienda el uso de especies autóctonas; su selección tiene influencia directa en el resto de elementos configuradores. Por ejemplo, para plantar un árbol de porte medio es necesario al menos 1 m de tierra y una capa drenante de espesor y resistencia acordes.



Figura 135. Cubierta vegetal seca.

Para la adecuada elección de la vegetación se debe considerar el espesor disponible de sustrato por capacidad estructural y dimensiones, la inclinación de la cubierta, la exposición al viento, la orientación, las sombras y la pluviometría. Además, también se deberá tener en cuenta la resistencia a las sequías y heladas, la altura de crecimiento, la densidad, la calidad del suelo y el mantenimiento necesario.



Figura 134. Cubierta vegetal en floración.

La plantación de la vegetación puede realizarse mediante:

Semillas. En este caso se precisa un sustrato de espesor superior a 7 cm y es recomendable combinar la siembra de las semillas con la plantación de esquejes de Sedum. No son adecuadas especies anuales o de crecimiento rápido. Con este sistema se consiguen campos de hierbas o de gramíneas y prados de flores, necesiéndose en torno a 25 gr/m² en cubierta plana, y 40 gr/m² en cubiertas inclinadas.

La plantación directa de especies. Con la combinación de distintas especies se consigue variedad de colorido por floración en la cubierta. Empresas especializadas en cubiertas vegetales proponen combinaciones de plantas vivaces, de plantas intermedias de cubrimiento de superficie, de gramíneas (resistentes a la sequía y con gran capacidad de regeneración) o de esquejes de Sedum para cubiertas extensivas.

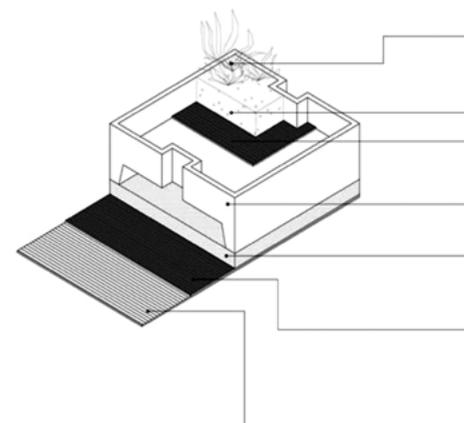
El cepellón plano. Es una bandeja plana especialmente diseñada para cubiertas vegetales, cubierta con plantas vivaces precultivadas en campo y que se puede emplear desde ajardinamientos extensivos hasta intensivos simples.

| Especies vegetales para plantación directa | | | | |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------|--------------------|------------------|
| Nombre botánico | Nombre popular | Altura (cm) | Color de floración | Mes de floración |
| Plantas vivaces en grupos de 3 a 7 plantas | | | | |
| <i>Dianthus carthusianorum</i> | Clavelina de los cartujos | 30-40 | Rosa | 6-9 |
| <i>Festuca Cinerea-Hybride</i> | Festuca cinerea híbrida | 25-30 | Pardusco | 6-7 |
| <i>Gypsophila repens Rosea</i> | Alborada rosa | 10-15 | Rosa | 5-7 |
| <i>Helianthemum nummularium</i> | Heliantemo | 5-10 | Amarillo | 5-7 |
| <i>Koeleria glauca</i> | Koeleria glauca | 20-40 | Azulado | 6-7 |
| <i>Petrorhagia saxifraga</i> | Saxifraga | 10-20 | Rosa-blanco | 6-9 |
| <i>Saponaria ocyroides</i> | Falsa alfibrega | 10-15 | Rosa | 5-7 |
| <i>Satureja montana ssp. illyrica</i> | Ajedrea de montaña ilírica | 10-15 | Violeta | 8-9 |
| <i>Saxifraga paniculata</i> | Hierba de las piedras | 20-25 | Blanco | 6-7 |
| Híbridos de <i>Sempervivum</i> | Siemprevivas híbrida | 10-20 | Rojo-rosa | 7-8 |
| Plantaciones intermedias de cubrimiento de superficie | | | | |
| <i>Antennaria dioica</i> | Pie de gato | 3-10 | Blanco-rosa | 5-6 |
| <i>Cerastium arvense</i> | Cuernecita compacta | 5-6 | Blanco | 5-6 |
| <i>Hieracium pilo sella</i> | Hierba de la salud | 15-20 | Amarillo | 5-7 |
| <i>Potentilla neumanniana</i> | Consueñas amarillas | 10-15 | Amarillo | 3-4 |
| <i>Prunella grandiflora</i> | Consueña mayor | 20 | Violeta | 6-8 |
| <i>Thymus doerfleri</i> | Tomillo | 15-20 | | |
| <i>Thymus Bressingham</i> | Bressingham Seeding | 6-8 | Rosa | 5-7 |
| <i>Thymus serpyllum</i> | Serpol | 4-5 | Violeta | 5-9 |
| Gramíneas | | | | |
| <i>Festuca ovina</i> | Cañuela ovina | 25-30 | Verde grisáceo | |
| <i>Festuca glauca</i> | Festuca azul | 25-30 | Azul brillante | |
| <i>Carex buchananii</i> | Carex | 50 | Anaranjado | |
| Esquejes | | | | |
| <i>Sedum album</i> | Uva cana | 5-10 | Blanco-rosa | 6-8 |
| <i>Sedum cauticola</i> | Pata de conejo | 10-15 | Rosa | 8-9 |
| <i>Sedum floriferum</i> | Sedo | 10-15 | Amarillo | 6-7 |
| <i>Sedum hybridum</i> | Sedo híbrido | 10-15 | Amarillo | 4-8 |
| <i>Sedum reflexum</i> | Tripmadam | 20-25 | Amarillo | 6-7 |
| <i>Sedum sexangulare</i> | Sedo hexagonal | 5-10 | Amarillo | 6-7 |
| <i>Sedum spurium album superburn</i> | Sedo bastardo | 10-15 | Blanco | 7-8 |
| <i>Sedum spurium fuldaglut</i> | Sedo bastardo | 10-15 | Rojo | 7-8 |
| <i>Sedum spurium roseum superburn</i> | Sedo bastardo | 10-15 | Rosa | 7-8 |

La alfombra vegetal. Es precultivada en campo durante un periodo de vegetación suficiente para cubrir la superficie de la cubierta vegetal. Se deben utilizar en cubiertas inclinadas o superficies expuestas al viento, se coloca sobre una bandeja putrescible y puede colonizarse por vegetación ajena. Las especies recomendadas son las de tipo Sedum, hierbas y gramíneas. Una variante son los soportes de fibra de coco, listos para colocar sobre las cubiertas con un sustrato de entre 6 y 10 cm; su uso depende de la situación y del clima.

Esta solución es muy útil en cubiertas inclinadas y en cubiertas planas para la protección contra viento. Se recomienda su colocación sobre una capa de sustrato de entre 2 y 3 cm de espesor para que la bandeja pueda enraizar.

Otra solución modular, con un almacenamiento de agua mayor, es la propuesta por el Grupo ABIO (UPM). Consta de elementos prefabricados de hormigón ligero, sobre los que se colocan tepes prevegetados de bajo porte y aislamiento térmico. El peso total del sistema es de 224 kg/m².



Vegetación autóctona de corta talla según el clima (hasta 20 cm)

Sustrato de mezcla estratificada (0,09 m)

Filtro sintético de fibras de poliéster, mecha (0,0015 m)

Pieza de hormigón ligero (0,6 x 0,6 m)

Aislante térmico de poliestireno extruido (espesor en función de normativa vigente).

Membrana impermeabilizante y antirraíces de PVC-poli cloruro de vinilo plastificado, armada con un filtro de fibras de vidrio (0,00126 m)

Membrana antipunzonamiento de fibras de poliéster (0,0026 m)

Figura 136. Elemento modular del Grupo ABIO.

| Especies para la alfombra vegetal | | | | |
|-----------------------------------|----------------|-------------|--------------------|------------------|
| Nombre botánico | Nombre popular | Altura (cm) | Color de floración | Mes de floración |
| <i>Sedum acre</i> | Pan de cuco | 5 | Amarillo | 4-6 |
| <i>Sedum album</i> | Uva cana | 5-10 | Blanco-rosa | 6-8 |
| <i>Sedum album murale</i> | Uva cana | 5-10 | Rosa blanquecino | 6-8 |
| <i>Sedum floriferum</i> | Sedo | 10-15 | Amarillo | 6-7 |
| <i>Sedum reflexum</i> | Tripmadam | 20-25 | Amarillo | 6-7 |
| <i>Sedum sexangulare</i> | Sedo hexagonal | 5-10 | Amarillo | 6-7 |
| <i>Sedum spurium fuldaglut</i> | Sedo bastardo | 10-15 | Rojo | 7-8 |
| <i>Delosperma</i> | Delosperma | 5-10 | Rosa fucsia | 5-10 |

El elemento precultivado modular. Son bandejas de rejilla de polietileno de baja densidad (LDPE) rellenas con sustrato, cultivadas previamente a su colocación en cubierta y unidas entre sí mediante engranajes altamente resistentes. La especie cultivada puede ser del tipo Sedum o césped.

El elemento especial para cubiertas inclinadas (> 5°). Es un elemento prefabricado de espuma rígida reciclada (EPS) con botones estables en la cara superior que engranan con el sustrato y canaletas de drenaje en su cara inferior. Con este elemento se consigue que la vegetación tenga una superficie de agarre, evitando el deslizamiento.



Figura 137. Elementos precultivados modulares.

Las fuerzas de empuje producidas por la inclinación se desvían hacia el peto o hacia barreras antiempuje, calculadas según las condiciones dadas. En caso de que la cubierta esté expuesta a vientos fuertes o cuando la pendiente sea mayor a 15°, se añadirá un tejido de yute grueso en el sustrato bajo la vegetación.

En cubiertas con una pendiente mayor a 25° se precisa un sistema especial que soporte las fuerzas de empuje producidas por la inclinación. En estos casos se utilizan elementos fabricados en polietileno de alta densidad con un nervio central que absorbe las fuerzas de empuje y que están unidos entre sí mediante perfiles T. Una vez montados, la superficie es transitable con seguridad.

La vegetación recomendada para cubiertas inclinadas debe estar formada por plantas de cepellón poco profundo. En cubiertas inclinadas con menos de 25° de pendiente se aconseja situar las plantas con floración en las superficies menos expuestas al sol y en grupos de 3 a 7 unidades. En este caso se pueden plantar tanto plantas vivaces como Sedum.

En cubiertas con inclinación mayor de 25° es mejor reducir la cantidad de plantas vivaces, puesto que el Sedum se mantie-

ne mejor con poco agua y garantiza una mejor protección antierosiva. Si la cubierta tiene más de 30° de pendiente, se recomienda emplear sólo Sedum.

El porcentaje recomendado de cada una de las especies que cubren la superficie inclinada es: *Sedum album*, 10 %; *Sedum floriferum*, 40 %; *Sedum hybridum*, 20 %; *Sedum sexangulare*, 10 % y *Sedum spurium*, 20 %.

La densidad de plantación según la inclinación de la cubierta debe ser como mínimo de 20 plantas/m² para inclinaciones inferiores a 15°, de 24 plantas/m² para inclinaciones entre 15 y 20°, de 28 plantas/m² para inclinaciones entre 20 y 25° y de 34 plantas/m² para inclinaciones entre 25 y 30°.

La fachada vegetal

Los elementos configuradores de la fachada vegetal son:

| **El soporte del sistema.** Es un elemento vertical resistente que soporta la sobrecarga añadida. Si la fachada es resistente se puede emplear como soporte, en caso contrario se utilizará una estructura suplementaria adosada que cumpla la función portante.

| **La estructura auxiliar.** Estructura secundaria fijada al elemento soporte que genera además una cámara de aire mejorando las condiciones de aislamiento del edificio a través de la propia cámara de aire o mediante

la incorporación de una capa de aislamiento térmico imputrescible.

| **El sustrato.** Es el medio que aporta los nutrientes a la planta y sirve para el desarrollo de sus raíces. Este sustrato puede estar contenido en celdas de materiales metálicos, plásticos o textiles. También puede sustituirse por áridos de diverso tamaño confinados o por una tela de fieltro.

| **El riego.** Generalmente se realiza por goteo para facilitar su control y optimizar el consumo. También es habitual recoger los lixiviados del riego para reutilizarlos, llegando incluso a regar las fachadas vegetales con aguas grises de los edificios aprovechando la capacidad depurativa del sistema.

| **La vegetación.** Se recomienda que sea autóctona, de bajo consumo hídrico, resistente a heladas y altas temperaturas. Como método de plantación se pueden usar semillas, cepellones o elementos precultivados.

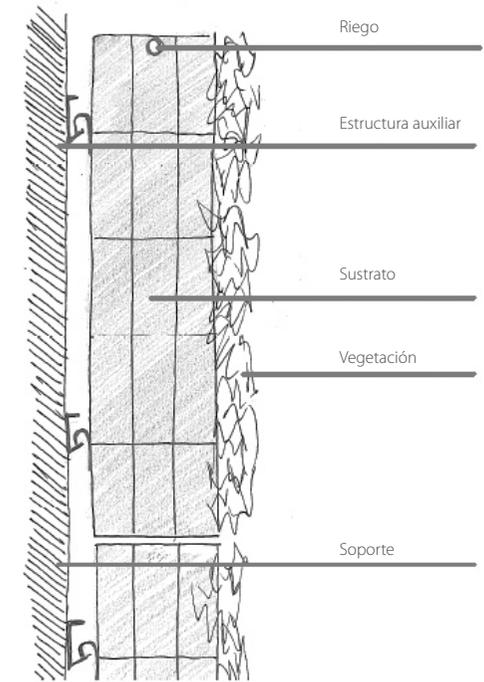


Figura 138. Componentes de la fachada vegetal.

| Especies del género Sedum para cubierta inclinada | | | | |
|---------------------------------------------------|----------------|-------------|--------------------|------------------|
| Nombre botánico | Nombre popular | Altura (cm) | Color de floración | Mes de floración |
| <i>Sedum album</i> | Uva cana | 5-10 | Blanco-rosa | 6-8 |
| <i>Sedum floriferum</i> | Sedo | 10-15 | Amarillo | 6-7 |
| <i>Sedum hybridum</i> | Sedo híbrido | 10-15 | Amarillo | 4-8 |
| <i>Sedum sexangulare</i> | Sedo hexagonal | 5-10 | Amarillo | 6-7 |
| <i>Sedum spurium album superburn</i> | Sedo bastardo | 10-15 | Blanco | 7-8 |
| <i>Sedum spurium roseum superburn</i> | Sedo bastardo | 10-15 | Rosa | 7-8 |
| <i>Sedum spurium variegatum</i> | Sedo bastardo | 10-15 | Rosa | 7-8 |

5.4. Tipología

Las superficies vegetales se pueden clasificar en función de distintos criterios, los más usados son:

- | Según el espesor del sustrato: intensivas y extensivas o ecológicas.
- | Según su uso: ornamental y cultivo hortofrutícola.
- | Según su composición: sin almacenamiento de agua o aljibe.
- | Según morfología: cubierta (plana o inclinada) o fachada vegetal.

No obstante, la clasificación más habitual es la que diferencia entre cubiertas vegetales intensivas y extensivas, estando directamente relacionada con el peso que supondrá para la estructura del edificio. En fachadas vegetales la clasificación es menos clara y depende, en gran medida, de los sistemas patentados.

En la siguiente tabla se muestra una clasificación de las cubiertas vegetales:

La gran variedad de tipologías de cubiertas y fachadas se resume en:

| Clasificación de superficie vegetal en la edificación | | | | |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Cubierta vegetal | | | Fachada vegetal | |
| Cubierta intensiva | Cubierta extensiva o ecológica | | Huerto | |
| | Cubierta plana | Cubierta inclinada | | |
| Aljibe | Monocapa | 3-10° 10-25° | Superficial Unitario | Opaca con cultivo hidropónico |
| Con lámina drenante | Plana sencilla | > 25° Monocapa | | Opaca con celdas de polietileno |
| Elevada sobre plots y aljibe | Plana con pequeño aljibe | Teja | | Opaca con malla de polietileno con sustrato |
| Sin almacenamiento | Plana con gran aljibe | | | Opaca con jardineras de geotextil |
| Con vegetación superficial | Plana ligera | | | Opaca con gaviones |
| Con vegetación unitaria | Plana con bandejas preplantadas | | | Opaca con caja metálica |
| | Plana con aljibe modular | | | Opaca con celdas drenantes Translúcida con invernadero Translúcida con paneles |

| Variaciones de la cubierta vegetal | | |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Intensiva | Aljibe Sin almacenamiento de agua | Vegetación superficial Vegetación superficial Vegetación en elementos unitarios |
| Extensiva o ecológica | Plana Inclinada | Vegetación superficial Vegetación superficial |
| Huerto urbano | Vegetación superficial Vegetación en elementos unitarios | |

La cubierta intensiva

Es un jardín situado en la parte superior del edificio y se caracteriza por tener un sustrato de profundidad superior a los 20 cm que permite plantar desde especies herbáceas hasta arbustos e incluso árboles, siempre que la capa vegetal se corresponda con las necesida-

des de la plantación. El peso oscila entre 240 y 1.100 kg/m² dependiendo del espesor del sustrato y de las especies plantadas. Precisan los mismos cuidados que un jardín es decir, riego, fertilización y poda periódica, siendo imprescindible incluir una lámina antirraíces adecuada.

| Vegetación | Vegetación en cubierta intensiva | | |
|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| | Arbusto pequeño | Arbusto grande | Árbol |
| Altura de crecimiento | 1 m | 3 m | 10 m |
| Espesor del sustrato | 22 cm | 32 cm | 82 cm |
| Peso | 340 kg/m ² | 500 kg/m ² | 1.100 kg/m ² |
| Capacidad retención de agua | 280 l/m ² | 420 l/m ² | 1.000 l/m ² |

| La cubierta intensiva del tipo aljibe. Su diseño les permite almacenar agua entre la superficie vegetal y el soporte estructural que aporta la disponibilidad de agua para riego mediante las mechas al aljibe, pudiéndose llegar a suprimir la red de riego. Constituyen un elemento de protección pasiva contra

incendios y de amortiguación térmica. La cantidad de agua almacenada puede variar desde una altura de 7 cm en sistema de bandejas de polipropileno hasta 50 cm en sistema con soportes elevado siendo la sobrecarga de este tipo de cubiertas mucho mayor.

| | Características de cubierta intensiva de tipo aljibe | |
|------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------|
| | Reserva de agua en la lámina drenante | Pavimento elevado con plots |
| Espesor del sustrato | > 20 cm | > 20 cm |
| Espesor del drenaje | 7 cm | 10-50 cm |
| Peso en saturación | Desde 360 kg/m ² | Desde 914 kg/m ² |
| Volumen de retención de agua | Desde 113 l/m ² | Desde 130 l/m ² |



Figura 139. Cubierta intensiva accesible en el Chicago City Hall, EEUU.



Figura 140. Cubierta intensiva inclinada.



Figura 141. Cubierta en Manhattan, EEUU.

Para el control de nivel de agua existen puntos de registro donde se encuentra el rebosadero que evacua a la red el exceso de agua. Es importante mantener siempre una lámina de agua permanente pudiéndose usar para ello el agua de la red de suministro o a la de un sistema de cisterna de retención de agua de lluvia.

| La cubierta intensiva con reserva de agua en lámina drenante. Se compone de una capa de vegetación, un sistema de riego –por goteo, habitualmente–, un sustrato, una lámina geotextil, un sustrato mineral retenedor de

agua, un sistema de drenaje y almacenamiento de agua de hasta 7 cm, una manta retenedora y protectora y una lámina impermeabilizante antirraíces.

Permite realizar todo tipo de ajardinamiento gracias a la alta retención de agua. El agua de lluvia se filtra a través del sustrato y se acumula en los huecos cóncavos del sistema de drenaje. Cuando estos huecos alcanzan su nivel máximo, el agua rebosa y a través de las perforaciones de la parte convexa pasa a la parte inferior donde es absorbida por la manta de fieltro retenedora de agua.

Las plantas toman el agua por capilaridad del sistema de drenaje y almacenamiento. Con un espesor de almacenamiento de 7 cm se consigue retener hasta 115 l/m², siendo el espesor mínimo para la capa de sustrato de 20 cm con lo que el espesor total mínimo del

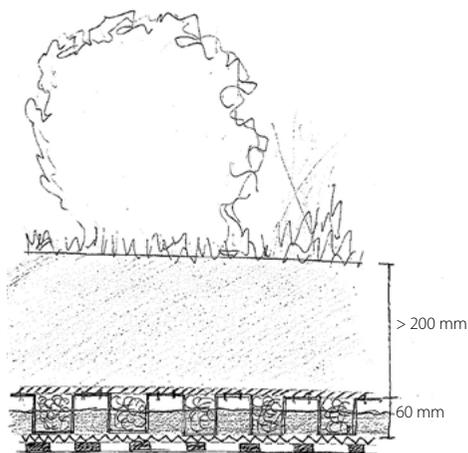


Figura 142. Cubierta intensiva con reserva de agua.

sistema será de 27 cm, aumentando según las especies que se quieran plantar.

Para sistema de aljibe, se recomienda que la pendiente de la cubierta sea nula y se debe disponer de registros y rebosaderos por los que se evacue el exceso de agua.

| La cubierta intensiva elevada sobre plots con aljibe. Dispone de una capa vegetación, un sustrato de espesor superior a 20 cm, una loseta resistente, un fieltro absorbente, unas mechas absorbentes que comunican el agua y el sustrato, los soportes regulables y la lámina impermeabilizante antirraíces.

Permite combinar distintos acabados vegetales y de pavimento. Con la retención de gran cantidad de agua en la parte inferior el riego de las plantas está asegurado por capilaridad a través de mechas. La regulación de los plots permite ajustar la profundidad del aljibe según las necesidades y la posibi-

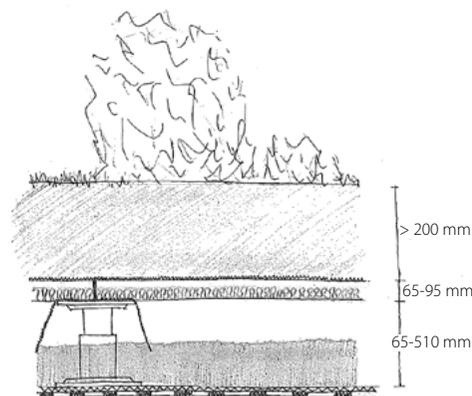


Figura 143. Cubierta intensiva elevada en plots y aljibe.

lidad de sobrecarga de la estructura. Se recomienda colocar sobre los plots una loseta resistente filtrante y aislante que sirve como soporte del sustrato o como propio acabado de cubierta. Esta cubierta es además un depósito de agua para usos auxiliares como incendios y aporta aislamiento y gran inercia térmica. Es, por tanto, la tipología de cubierta vegetal más completa.

| La cubierta intensiva sin almacenamiento de agua. Se compone de vegetación, un sustrato de alta capacidad de absorción, una lámina separadora geotextil y una capa inferior de drenaje conseguida con bandejas de pequeña profundidad de polipropileno de 2 cm o mediante una capa de grava de mayor granulometría. El agua asciende por capilaridad hasta el sustrato y será necesaria la aportación de más agua mediante un sistema de riego por goteo.

| La cubierta intensiva con vegetación superficial. Cubierta con retención de agua leve en su capa inferior. Permite la plantación de muchas variedades de especies, adaptando la cantidad del sustrato a las necesidades de cada una de ellas.

Se conforma con vegetación, riego (por goteo), sustrato (> 20 cm), lámina geotextil, sistema de drenaje y retención de agua (> 4 cm), e impermeabilizante antirraíces. El agua de lluvia queda retenida, ahorrando riego y asegurando un mejor crecimiento de la

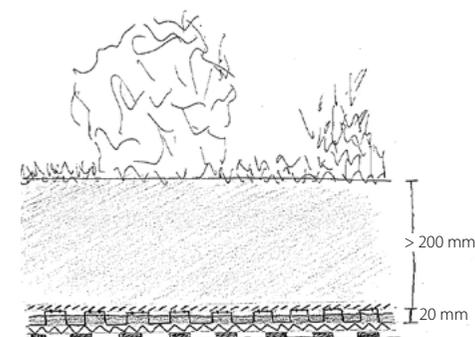


Figura 144. Cubierta intensiva vegetación superficial.

| Características de cubierta vegetal intensiva sin almacenamiento de agua | | |
|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| | Reserva de agua en la lámina drenante | Pavimento elevado con plots |
| Espesor del sustrato | > 20 cm | > 20 cm |
| Espesor del drenaje | 4 cm | Desde 8 cm |
| Peso en saturación | Desde 180 kg/m ² | |
| Volumen de retención de agua | Desde 68 l/m ² | |

vegetación. Para el buen funcionamiento de la cubierta se precisa una pendiente mínima del 1%. El agua de lluvia se infiltra a través del sustrato, se filtra en el geotextil y se acumula en los huecos cóncavos del sistema de drenaje o en la manta retenedora. Las plantas toman el agua directamente por capilaridad.

| La cubierta intensiva con vegetación unitaria. En cubiertas existentes y sin posibilidad de implantar sistemas que abarquen la totalidad de su superficie se puede optar por la implantación de maceteros de grandes dimensiones. Para ello se necesita disponer de un soporte estructural que resista la sobrecarga e implantar un sistema de riego por goteo. Dentro de cada macetero se debe colocar un sustrato, una lámina geotextil, una capa de drenaje y un rebosadero.

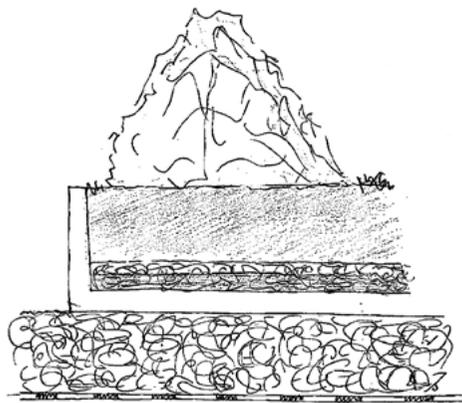


Figura 145. Cubierta intensiva con vegetación unitaria.

La cubierta extensiva

Una cubierta extensiva es un tapiz vegetal que se caracteriza por disponer de un sustrato con un espesor de entre 3 y 20 cm. La vegetación a seleccionar debe ser sencilla, recomendándose especies autóctonas resistentes a climas secos y heladas y que precisen mínima o nula irrigación, fertilización o mantenimiento. Las plantas crasas y los Sedums son las óptimas para este tipo de cubiertas. La cubierta vegetal extensiva no es accesible y su peso varía según la solución constructiva, situándose en torno a 150 kg/m².

Las clases de cubiertas vegetales más extendidas son:

| La cubierta extensiva monocapa. Es un sistema simple compuesto por un sistema de riego, sustrato de 15 cm, diferenciado en capa superior nutritiva para soporte de vegetación y capa inferior de drenaje con material poroso, una lámina geotextil, una capa drenante y una lámina impermeabilizante antirraíces.

El espesor total está en torno a los 15 cm. Para que evitar que se produzca el estancamiento de agua la inclinación de cubierta debe estar entre el 5 y el 15 %. Esta solución

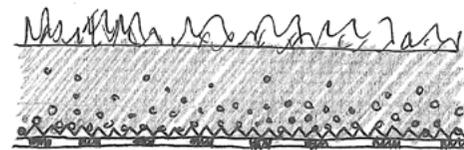


Figura 146. Cubierta extensiva monocapa.

permite drenar alrededor del 28 % del agua de lluvia recibida.

| La cubierta extensiva plana sencilla. Es el sistema más sencillo para la creación de una cubierta vegetal y está formado por un elemento drenante de 2 cm de espesor y una manta retenedora del agua de lluvia. La vegetación que se puede plantar es muy variada y se recomienda combinar las especies adecuadamente para poder conseguir floración durante casi todo el año.

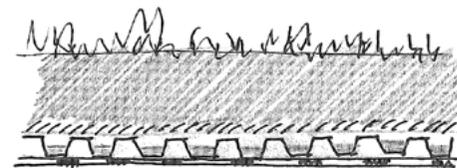


Figura 147. Cubierta extensiva plana sencilla.

El espesor mínimo de sustrato debe ser de 10 cm para Sedum, 13 cm para crasas y 20 cm para especies aromáticas. Entre el sustrato y la capa drenante se coloca una lámina geotextil que evite la pérdida de finos. El riego se produce por capilaridad, se recomiendan los sistemas de riego por goteo y la capacidad drenante ronda los 600 l/(m² × hora). El mantenimiento es mínimo y se reduce a retirar las especies dañadas una vez al año.

| La cubierta extensiva plana con pequeño aljibe. El aljibe se construye mediante bandejas de polipropileno de 7 cm de espesor para almacenar el agua de lluvia, produ-

ciéndose el riego por capilaridad al sustrato. Las bandejas cuentan con perforaciones en su parte superior que actuarán a modo de rebosadero en caso necesario. Este tipo de cubierta permite plantar especies con necesidades hídricas mayores. Sobre la capa drenante se colocará una lámina geotextil que actúa de filtro. Su capacidad drenante es de 1.300 l/(m² × hora).

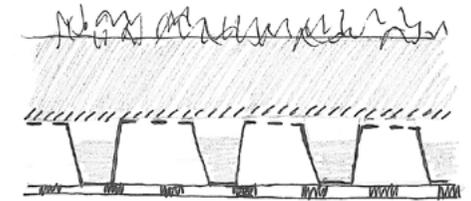


Figura 148. Cubierta extensiva plana pequeño aljibe.

La capacidad de almacenamiento es de 18 l/m² y el mínimo espesor de sustrato es de 6 cm para Sedum, 10 cm para crasas, 15 cm para aromáticas y 20 cm para céspedes. Como principal labor de mantenimiento se debe retirar anualmente las especies dañadas.

| La cubierta extensiva plana con gran aljibe. En este sistema se emplean como soporte cajas de HPE, elementos prefabricados de

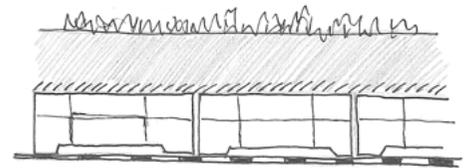


Figura 149. Cubierta extensiva plana gran aljibe.

espuma rígida de EPS o plots regulables en altura con objeto de hacer un aljibe con capacidad de hasta 120 l/m². Permite la plantación de cualquier tipo de vegetación con cualquier tipo de sustrato y sin precisar riego. La profundidad del sustrato varía según el tipo de especie.

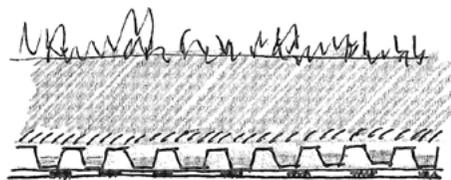


Figura 150. Cubierta extensiva plana ligera.

La cubierta extensiva plana ligera. Está compuesta por paneles de espuma de poliuretano como capa retenedora y de drenante con sustrato de 6 cm para Sedum y de 10 cm para céspedes. La vegetación se coloca en forma de tepes, enraíza en la espuma bajo la que se coloca una lámina impermeabilizante y no precisa sustrato adicional. El espesor y el peso son mínimos: 35 kg/m²

La cubierta debe tener una inclinación de entre el 1 y 5%, asegurando la evacuación de aguas. La capacidad de almacenamiento es de 31 l/m² y la capacidad de flujo en plano es de 600 l/(m² × hora). Como mantenimiento precisa retirar las especies en mal estado una vez al año y es recomendable su riego.

La cubierta extensiva plana con bandejas preplantadas. Son elementos prefabricados con vegetación que simplifican la construcción, el tiempo de ejecución y el resultado final. Están especialmente indicadas en cubiertas planas con afección por viento. Si la cubierta tiene una pendiente inferior al 2 % debe contar con una capa drenante.

Se comercializan bandejas de dimensiones 50 × 50 cm unidas por clips de 9 cm de espesor y su peso húmedo ronda los 50 kg/m². Su mantenimiento es anual.



Figura 151. Cubierta extensiva con bandejas prevegetadas.

La cubierta extensiva plana con aljibe modular vegetado. Es un elemento modular prefabricado de hormigón poroso que actúa como soporte. Incluye una mecha que por capilaridad transmite agua y nutrientes al sustrato discontinuo.

Cada módulo pesa 46,9 kg y representa una sobrecarga de 224 kg/m². Este sistema es una propuesta del Grupo ABIO de la Universidad Politécnica de Madrid.

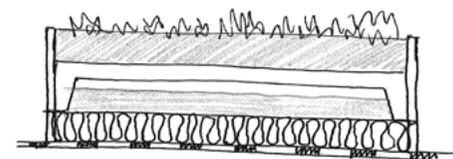


Figura 152. Cubierta extensiva plana con aljibe modular vegetado.

Resumen de sistemas para cubiertas extensivas

| Vegetación | Sistema monocapa | Sistema sencillo | Sistema con aljibe pequeño | Sistema de aljibe grande | Sistema ligero | Bandejas preplantadas | Aljibe modular vegetado |
|----------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| Espesor del sustrato | Sustrato como drenaje ≤ 15 cm | 10 cm de Sedum 13 cm de crasas 20 cm de aromáticas | 6 cm de Sedum 10 cm de crasas 15 cm de aromáticas 20 cm de césped | 6 cm de Sedum 10 cm de crasas 15 cm de aromáticas 20 cm de césped | Espuma de poliuretano como capa drenante y sustrato de 6 cm de Sedum 10 cm de césped | 9 cm de bandeja con Sedum y crasas | 9 cm |
| Espesor del drenaje/aljibe | — | 2 cm | 9 cm | 15 cm | — | — | 9 cm |
| Peso en saturación | 100 kg/m ² | ≥ 150 kg/m ² | ≥ 120 kg/m ² | ≥ 230 kg/m ² | ≥ 35 kg/m ² | 50 kg/m ² | 224 kg/m ² |
| Retención de agua | 29 l/m ² | ≥ 3 l/m ² | ≥ 18 l/m ² | ≥ 120 l/m ² | ≥ 31 l/m ² | 15 l/m ² | — |
| Capacidad drenante | 28 % | 600 l/(m ² × h) | 1.300 l/(m ² × h) | — | 600 l/(m ² × h) | 600 l/(m ² × h) | — |
| Pendiente | 5-15 % (2-10°) | 1-5 % Hasta 3° | 0-15 % Hasta 9° | 0 % | 1-5 % Hasta 3° | 0-10 0° Hasta 45° | 1-5 % Hasta 3° |
| Precio orientativo (€/m ²) | 46 €/m ² | 85 €/m ² | 90 €/m ² | 100 €/m ² | 90 €/m ² | 80 €/m ² | — |

La cubierta vegetal inclinada

Son cubiertas con una pendiente de entre 3 y 20° cuya construcción es más fácil y económica puesto que se pueden construir con una sola capa sin necesidad de incluir el drenaje inferior. El sustrato tiene la capacidad de almacenar el agua y drenar la parte sobrante hasta el límite de la cubierta libre o al canalón.

Para la cubierta vegetal inclinada se deben tomar medidas especiales relacionadas con las fuerzas de empuje debidas a la inclinación.

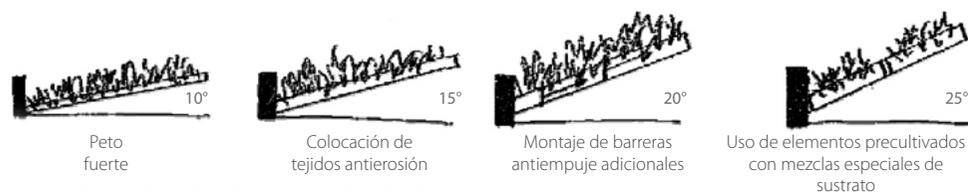


Figura 153. Tipología de cubierta vegetal inclinada.

Si fuera necesario el riego se recomienda hacerlo por goteo desde cumbre y en caso de pendiente fuerte se deben colocar protecciones contra el deslizamiento. La instalación de paneles solares en cubierta es compatible con el crecimiento de la vegetación.

Cubierta extensiva inclinada de 10 a 25° con capa drenante. Está compuesta por una lámina impermeabilizante antirraíces, una manta absorbente, una capa drenante de espuma dotada con concavidades para la re-

tención de agua, perforaciones y un sistema de canaletas en su parte inferior. El sustrato se coloca con un mínimo de 5 cm por encima de los alveolos del drenaje y se deben incluir petos o barreras antiempuje.

En cubiertas con inclinación superior a 15° o con exposición a fuertes vientos se recomienda colocar un tejido de protección antierosivo de yute o coco. La vegetación será especialmente seleccionada para cubiertas inclinadas con cepellón poco profundo. El peso saturado varía entre 115 y 145 kg/m².

La cubierta extensiva con inclinación superior a 25° y sistema antideslizamiento. Este tipo de cubierta debe incorporar un sistema adicional que asegure su estabilidad evitando el deslizamiento del sustrato. También incluye una lámina impermeabilizante

antirraíces y una manta hidroabsorbente. El sistema antideslizamiento está formado por elementos prefabricados en polietileno (PE) conectados entre sí y dotados con un nervio central reforzado que absorbe las fuerzas de empuje producidas por la inclinación.

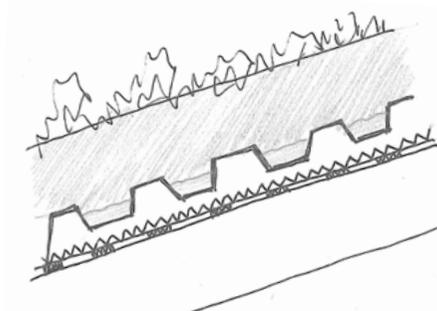


Figura 154. Cubierta inclinada 10-25° con capa drenante.

| Vegetación Sedum | Características de cubiertas vegetales inclinadas | | | | | Sistema monocapa | Cubierta de teja | Bandejas prevegetadas |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------------------|--|------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Pendiente < 25° | | | Pendiente > 25° | | | | |
| Pendiente | 15-30 % 10-15° | 30-40 % 15-20° | 40-50 % 20-25° | > 50 % > 25° | | 5-36 % | 0-100 % Hasta 45° | Cualquiera |
| Altura de crecimiento | ≤ 15 cm | ≤ 15 cm | ≤ 15 cm | ≤ 15 cm | | ≤ 15 cm | ≤ 15 cm | ≤ 10 cm |
| Espesor del sustrato | 5 cm | 6 cm | 7 cm | 12 cm | | 14-18 cm | 10 cm | Bandeja: 3-4 cm |
| Espesor del drenaje y derivación de empuje | 8 cm | 8 cm | 8 cm | capa portante de vegetación y elemento modular | | drenaje y sustrato mezclados | 10 cm | Total ≥ 25 cm |
| Peso en saturación | 115 kg/m ² | 130 kg/m ² | 145 kg/m ² | 155 kg/m ² | | < 160 kg/m ² | 100 kg/m ² | 320 kg/m ² |
| Volumen de retención de agua | 32 l/m ² | 36 l/m ² | 40 l/m ² | 64 l/m ² | | 70 l/m ² | — | — |
| Precio | 150 €/m ² | 150 €/m ² | 150 €/m ² | 200 €/m ² | | 77 €/m ² | — | 130 €/m ² |

El sustrato cubre al menos 1 cm el sistema, siendo su capa inferior la encargada de ayudar a la desviación de las fuerzas de empuje y su capa superior la que sirve para el desarrollo de la vegetación. La sobrecarga provocada por este tipo de cubierta se sitúa en torno a 155 kg/m².

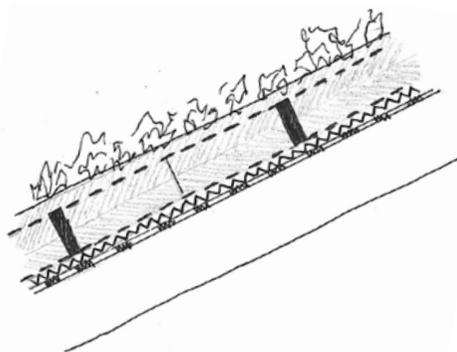


Figura 155. Cubierta inclinada > 25° con sistema anti-deslizamiento.

La cubierta extensiva inclinada monocapa. Es un sistema sencillo, altamente efectivo y de bajo coste que está indicado para techos con una inclinación de entre el 5 y 36 %. El sustrato acoge la vegetación y almacena y drena el agua sobrante. Se recomienda que parte del material utilizado para formar el sustrato sea poroso (piedra pómez, escoria, arcilla expandida) para reducir el peso, aumentar el aislamiento térmico, facilitar la respiración de las raíces y paliar la lluvia ácida. El espesor total del sustrato puede variar entre 14-18 cm. La vegetación será de pastos y Sedum.

La cubierta inclinada de teja. Son rollos de fibra vegetal compactada que integran un sistema de riego por exudación con gran capacidad drenante y colocados en la cubierta de teja existente. Se sujetan mediante diferentes procedimientos dependiendo de la inclinación de la cubierta y de la exposición al viento. La vegetación empleada es de tipo Sedum y crasas con el objetivo de que el mantenimiento sea mínimo. El peso adicional a la estructura es de 50 kg/m².

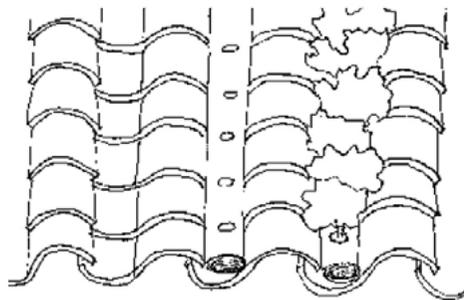


Figura 156. Cubierta inclinada de teja.

La cubierta extensiva inclinada con bandejas prevegetadas. Está formada por módulos de soporte de polietileno de baja densidad (LDPE) con vegetación incorporada en su cara superior unidos mediante engranajes altamente resistentes. La vegetación preculтивada puede ser de diferentes especies de Sedum o césped y el incremento de peso saturado es de 40 kg/m².

El huerto urbano en cubierta

El redescubrimiento de las cubiertas como posible lugar urbano de ocio y aprovechamiento ha provocado la aparición de los huertos urbanos. En la actualidad existen dos corrientes de este tipo de huertos: la ocupación total de la cubierta o la colocación de elementos unitarios donde se cultivan los alimentos.



Figura 157. Cubierta de Brooklyn Grange en Nueva York, EEUU.

El huerto superficial en cubierta plana. Se emplea para cultivar vegetales y su espesor varía de 40 a 60 cm. Debe tener un sustrato rico en nutrientes y es necesario contar con un sistema de riego regulado y programado acorde a las necesidades y oxigenar el sustrato removiéndolo varias veces al año.

| | Características del huerto urbano en cubierta | |
|------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|
| | Huerto superficial | Huerto en elementos unitarios |
| Espesor del sustrato | 40-60 cm | > 20 cm |
| Espesor del drenaje | 2,5 cm | 10-50 cm |
| Peso en saturación | Desde 380 kg/m ² | Desde 100 kg/m ² |
| Volumen de retención de agua | 3-5 l/m ² | Sin datos |
| Precio orientativo | 67 €/m ² | 120 €/m ² |

El agua de riego se acumulará en la capa drenante y posteriormente subirá por capilaridad a la vegetación evitando que se encharque el sustrato en su parte inferior. Las especies que se pueden cultivar en 40 cm de sustrato son muy variadas; zanahorias, patatas, cebollas, judías, tomates, lechugas, pimientos, fresas, así como plantas aromáticas y cualquier otra especie de porte medio.

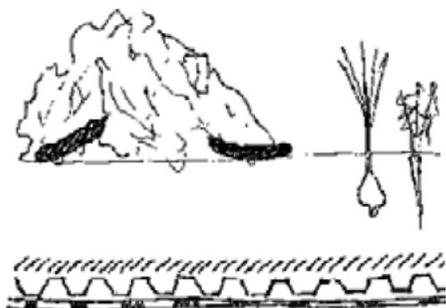


Figura 158. Huerto en superficie.

| El huerto de elementos unitarios en cubierta plana. En cubiertas existentes con acabado transitable es factible la incorporación de elementos para la creación de huertos urbanos sin necesidad de ocupar totalmente la superficie de cubierta. En las “unidades de cultivo”, la profundidad del sustrato dependerá de las especies seleccionadas, siendo suficiente un espesor de entre 15 y 30 cm para poder cultivar gran variedad de plantas. Lo importante es la oxigenación de la planta que se consigue a través del perímetro y de un riego adecuado.

El sustrato empleado debe ser rico en nutrientes y está compuesto por una mezcla de tierra y otras sustancias orgánicas en proceso de fermentación. También es importante contar con una superficie de drenaje en la parte inferior de la unidad de modo que se evite el encharcamiento.

Existen sistemas comerciales realizados en material geotextil transpirable, cien por cien reciclable y con 40 cm de profundidad. Estas soluciones son ligeras y permiten la oxigenación de la planta.

Se han realizado experimentos con huertos urbanos donde se emplean materiales reciclados en cubierta como contenedores que han conseguido buenos resultados –neumáticos: la concavidad inferior como reserva de agua–. Otra opción es reducir al máximo el espesor del sustrato asegurando el riego y una buena oxigenación, pudiéndose cultivar zanahorias, tomates, judías, maíz, guisantes, etc. Para ello es importante incluir en el fondo algún material



Figura 159. Elementos unitarios en una cubierta plana.



Figura 160. Elementos singulares en una cubierta plana.



Figura 161. Elementos singulares en una cubierta plana.



Figura 162. Huerto con sustrato de 7 cm de espesor.

reciclado que sirva como drenaje (virutas de madera, áridos...) ya que si el sustrato tiene los suficientes nutrientes, las raíces no precisan profundizar para encontrarlos.

La fachada vegetal

La Unión Europea recomienda disponer de 20 m² de vegetación por habitante y para alcanzar este objetivo se puede incrementar la vegetación urbana utilizando las fachadas de los edificios existentes, consiguiendo además el aislamiento, la protección frente a la lluvia y el viento, la amortiguación del ruido, la protección solar y la mejora ambiental.

Para su diseño se debe considerar el peso y la sujeción de la superficie vegetal a la fachada. En este caso la sobrecarga puede llegar a los 50 kg/m² y la presencia de rocío, lluvia o nieve podría duplicarse en una planta caduca y triplicarse en una perenne. Para dimensionar las sujeciones y la estructura soporte se deben considerar la fuerza del viento y el crecimiento de las plantas.

En su diseño es recomendable dejar espacio entre el soporte de las planta y el muro existente, permitiendo la circulación de aire. Como tipologías principales encontramos:

| La fachada vegetal opaca con cultivo hidropónico. Es un sistema rápido y sencillo, con poco mantenimiento que consiste en un adosado a la fachada existente mediante paneles aminoplásticos sujetos a una perfi-

lería vertical. Sobre estos paneles se coloca una doble lámina de fieltro donde se fijan las raíces. Por ella circula una solución de riego hidropónica, por lo que no precisa sustrato, y la densidad de la vegetación será como mínimo de 30 ud/m².

Los requisitos previos del lugar donde se va a implantar son: disponer de una toma de agua donde instalar el sistema de fertirrigación, instalar una conducción de agua de PE hasta el pie del sistema de riego, disponer de un lugar protegido para la instalación de aparatos de control, realizar una canalización de lixiviados de la parte inferior e incorporar



Figura 163. Cubierta vegetal del Caixa Forum, Madrid.

depósitos de fibra para almacenaje de las soluciones nutritivas.

El sistema de riego es un circuito cerrado con control automatizado que produce por la parte superior de la fachada y recoge los lixiviados en una canaleta inferior hasta un depósito. El mantenimiento será de poda de vegetación cada 24 meses, revisión periódica del control de fertirrigación y rellenar los depósitos de fertilizante. El espesor total del sistema ronda los 20 cm y su peso saturado los 35 kg/m².



Figura 164. Fachada vegetal de cultivo hidropónico.

| La fachada vegetal opaca de celdas de polietileno. Son módulos prefabricados de PE precultivados y de dimensiones 60 × 30 × 10 cm con un peso por módulo de 15 kg y un peso saturado de 85 kg/m². Cada módulo cuenta con un depósito aljibe para la optimización del suministro de agua a las plantas.

El riego se realiza por la parte superior de la fachada mediante un circuito de fertirrigación

cerrado. Para la sujeción a fachada se emplean perfiles metálicos fijados mecánicamente y la vegetación seleccionada será la adecuada al microclima de cada una de las fachadas.

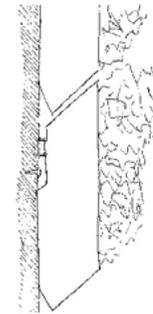


Figura 165. Fachada vegetal con celdas de polietileno.

| La fachada vegetal opaca de malla de polietileno con sustrato. Permite la depuración de aguas residuales domésticas por biofiltración permitiendo así su reutilización posterior en inodoros o riego de plantas. La reutilización

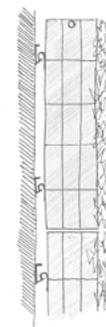


Figura 166. Fachada vegetal de malla de polietileno con sustrato.

del agua obtenida se encuentra dentro del marco legal aplicable para el riego de plantas (RD 1620/2007).

El sistema se compone de celdas metálicas que contienen sustrato rodeado por una lámina geotextil donde se desarrolla la vegetación. Se sujetan a la fachada mediante rieles de anclaje y el riego se realiza por la parte superior del panel. Las plantas empleadas son nitrófilas (macrófitas) y el grosor del sistema es de 14 cm y su peso saturado de 70 kg/m².

| La fachada vegetal opaca de jardineras de geotextil. Son jardineras de geotextil para la creación de paredes verticales fijadas a la pared mediante tirafondos y dotadas de sistema de riego en su parte superior. El frente es transpirable y permite evaporar el exceso de humedad evitando la colocación de drenajes.

La barrera antihumedad que tiene el tejido de la jardinera evita que el agua pueda traspasar la jardinera y ayuda a retener el agua en su interior, humedeciendo raíces y manteniendo los nutrientes del sustrato.

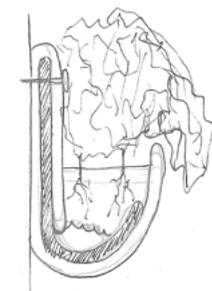


Figura 167. Jardinera de geotextil.

| **La fachada vegetal opaca de gaviones.** Está formada por módulos de 55 x 55 cm de malla metálica de acero inoxidable electrosoldados rellenos con piedra volcánica tras la que se sitúa una celda drenante de polipropileno con sustrato. Este tipo de fachada incluye aislamiento y una estructura auxiliar. El aislante debe ser imputrescible y la estructura auxiliar se puede colocar sobre la fachada existente, creando una cámara de aire y mejorando las condiciones climáticas del edificio –el diseño de este tipo de fachada corresponde al Grupo Abio de la UPM–.

La vegetación empleada será de tipo rupícola con diferentes periodos y colores de floración. Su desarrollo será pequeño con alta capacidad tapizante y escasas necesidades de riego.

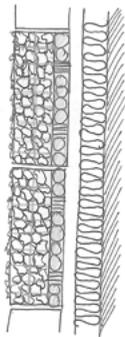


Figura 168. Gaviones.

| **La fachada vegetal opaca de caja metálica.** Formada por paneles vegetales desmontables modulares de 60 x 60 cm, en cajas metálicas resistentes a la humedad y con base de poliestireno extruido –el diseño de este tipo de fachada corresponde al Grupo Abio de la UPM–. Disponen de sustrato envuelto en una lámina geotextil, con nutrientes y elementos que propician el crecimiento de la vegetación. Los módulos se anclan a la pared existente mediante una subestructura que incluye una cámara de aire. Las especies plantadas seleccionadas serán autóctonas y el sistema de riego recomendado es por goteo mediante tuberías ubicadas en la parte superior de cada uno de los paneles vegetales.

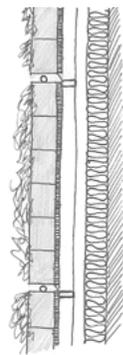


Figura 169. Fachada vegetal modular.

| **La fachada vegetal opaca de celdas drenantes.** Se trata de celdas prefabricadas de polipropileno rellenas de sustrato y envueltas en fieltro de lana con pequeños cortes donde se introducen las especies vegetales –el diseño de este tipo de fachada corresponde al Grupo Abio de la UPM–.

Dispone de sistema de riego cerrado por goteo en cada uno de los paneles. En la parte inferior de la fachada se coloca un canalón de chapa que recoge los excedentes de riego y recircula el agua sobrante.



Figura 170. Celdas drenantes.

| **La fachada vegetal translúcida de paneles deslizantes.** Es una protección exterior móvil con vegetación trepadora caduca que permite reducir ganancias de calor. La vegetación crece desde una jardinera inferior incorporada en el panel compuesta por una chapa plegada de aluminio anodizado, un canalón-aljibe en su parte inferior, unas mechas hacia el sustrato interior de las placas rígidas de polipropileno celulares y una lámina geotextil. Desde la jardinera se colocan tensores helicoidales para soporte de las plantas trepadoras.



Figura 171. Paneles deslizantes.

5.5. Recomendaciones de diseño

Para una cubierta de 100 metros cuadrados la cantidad de agua aprovechable se calcula conforme a la precipitación media anual \times la superficie de la cubierta \times el factor aprovechamiento:

Zona A. $949,72 \times 100 \text{ m}^2 \times 0,5 = 47.486 \text{ l/año}$.
Dimensiones del depósito: $47.486 \text{ l/año} \times 30/365 = 3.900 \text{ l}$ (aljibe de 3,9 cm de altura en una cubierta de 100 m^2).

Zona B. $449,58 \times 100 \text{ m}^2 \times 0,5 = 22.479 \text{ l/año}$.
Dimensiones del depósito: $22.479 \text{ l/año} \times 45/365 = 2.771,38 \text{ l}$ (aljibe de 2,8 cm en una cubierta de 100 m^2).

Zona C. $395,05 \times 100 \text{ m}^2 \times 0,5 = 19.752,5 \text{ l/año}$.
Dimensiones del depósito: $19.752,5 \text{ l/año} \times 60/365 = 3.246,9 \text{ l}$ (aljibe de 3,2 cm en una cubierta de 100 m^2).

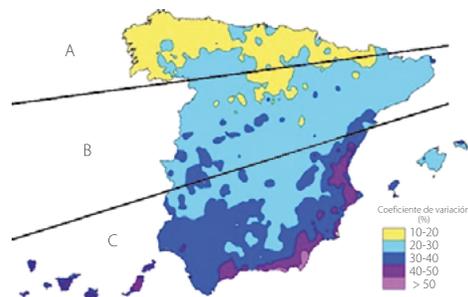


Figura 172. División geográfica según la variación de la precipitación.

| | | Resumen de recomendaciones de diseño | | | | | |
|--------------------|--|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| | | Zona A | | Zona B | | Zona C | |
| Condiciones | | Precipitaciones frecuentes y de intensidad | | Precipitaciones esporádicas con intensidad media | | Precipitaciones esporádicas con gran intensidad | |
| | | Suelo permeable | Suelo impermeable | Suelo permeable | Suelo impermeable | Suelo permeable | Suelo impermeable |
| Objetivos | | | | | | | |
| | | Infiltración colada al agua del terreno. Almacenamiento recomendable. | | Almacenamiento recomendable para reutilización. Infiltración controlada al terreno de excesos. | | Acumulación máxima para reutilización. Ralentización e infiltración al terreno de excesos. | |
| Volumen almacenado | | 3.900 litros = aljibe de 3,9 cm en una cubierta de 100 m^2 | | 2.771 litros = aljibe de 2,8 cm en una cubierta de 100 m^2 | | 3.246 litros = aljibe de 3,2 cm en una cubierta de 100 m^2 | |
| | | | | | | | |
| Estrategia | | Aumento de la capacidad de absorción del terreno para la infiltración | | Acumulación perimetral o puntual (riego, limpieza o baldeo) | | Acumulación perimetral o puntual (riego, limpieza o baldeo) | |
| | | Evacuación subsuperficial a zona permeable o a zona de acumulación | | Acumulación perimetral o puntual (riego, limpieza o baldeo) | | Acumulación (riego, limpieza o baldeo) Infiltración a terreno | |
| | | Evacuación subsuperficial a depósitos de acumulación (riego, limpieza o baldeo) | | Evacuación subsuperficial a depósitos de acumulación (riego, limpieza o baldeo) | | Evacuación subsuperficial a depósitos de acumulación (riego, limpieza o baldeo) | |

A continuación exponemos las recomendaciones según la zona climatológica.

Criterios en Zona A

| La cubierta plana. La cubierta plana más adecuada es la cubierta vegetal extensiva con pequeño aljibe (inferior a 4 cm) conectada a depósito de infiltración de agua al terreno. Se consigue almacenar agua y permite el desarrollo de la vegetación pudiendo además emplearse en otros usos como protección contra incendios o baldeo.

En caso de periodos muy secos el aljibe debería recargarse con agua de la red y es recomendable incluir una instalación de riego por goteo.

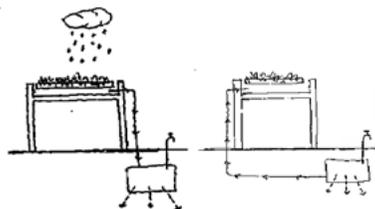


Figura 173. Cubierta plana en Zona A.

| La cubierta inclinada. El sistema idóneo es la cubierta vegetal extensiva monocapa con capa drenante puesto que tiene capacidad de almacenamiento de agua suficiente para el crecimiento de la vegetación con lluvias frecuentes. La cantidad máxima de alma-

cenamiento en sus capas de sustrato es de 15 l/m². En caso de lluvias abundantes el exceso se empleará para otros usos dentro del mismo edificio como el riego, la limpieza o los inodoros. Se recomienda instalar un sistema de riego por goteo para episodios esporádicos de sequía. Para la infiltración al terreno se recomienda combinar la cubierta vegetal con un sistema de almacenamiento e infiltración.

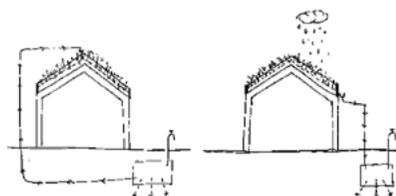


Figura 174. Cubierta inclinada en Zona A.

| La fachada vegetal. El sistema adecuado es el de jardineras de geotextil. En este caso la captación de agua de lluvia es menor que en cubiertas vegetales, por lo que no se almacena agua para otros usos que no sean las propias necesidades hídricas de la vegetación. Con un régimen de lluvias elevado el material de las jardineras puede conservar la humedad evitándose el riego de la fachada vegetal.

Si la cantidad de agua captada es excesiva el material traspirable permitirá que se eva-

pore el agua sobrante. También se recomienda instalar un riego por goteo para afrontar episodios esporádicos de sequía.

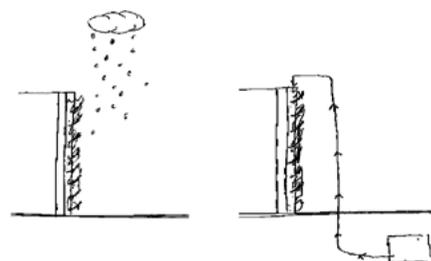


Figura 175. Fachada vegetal en Zona A.

Criterios en Zona B

| La cubierta plana. La cubierta más indicada es la cubierta vegetal extensiva con aljibe, donde se consigue captación y almacenamiento del agua de lluvia. Es aconsejable almacenar agua para épocas secas en aljibe de más de 15 cm de espesor siempre que la estructura lo permita. En caso de épocas

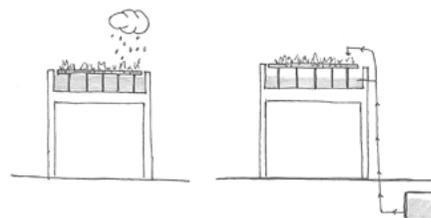


Figura 176. Cubierta plana vegetal en Zona B.

de sequía el aljibe puede ser recargado con agua de la red para mantener la vegetación.

En caso de lluvias muy abundantes es posible utilizar el agua para otros usos como el baldeo, el riego, los inodoros y la protección contra incendios.

| La cubierta inclinada. El sistema más adecuado es la cubierta vegetal extensiva con lámina de drenaje y pendiente inferior a 25° que permite almacenar una cantidad de agua de lluvia considerable –entre 32 y 60 l/m²–, reducir el riego en cubierta y alcanzar buenas condiciones para el crecimiento de la vegetación. Para zonas con intensidad media de lluvias se aconseja la instalación de un elemento de almacenaje independiente fuera de la cubierta –enterrado o a cota de terreno–.

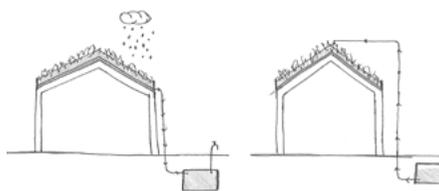


Figura 177. Cubierta inclinada vegetal en Zona B.

| La fachada vegetal. En este caso interesa disponer de un sistema con bajas exigencias hídricas y bajo mantenimiento y se recomiendan dos sistemas para esta situación: la fachada vegetal mediante celdas drenantes prefabricadas y la fachada vegetal mediante gaviones.

En época de lluvias no sería necesario el riego adicional ya que las necesidades hídricas de las especies rupícolas son reducidas. El excedente de agua se derivará a un depósito externo para utilizarla en otras épocas o usos.

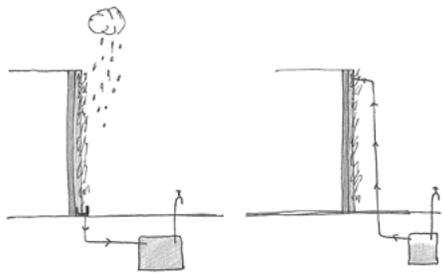


Figura 178. Fachada vegetal en Zona B.

Criterios en Zona C

| La cubierta plana. El sistema recomendado es la cubierta vegetal extensiva con pequeño aljibe. En esta zona climática las lluvias son escasas y cuando se producen son torrenciales, por lo que interesa disponer de un sistema que permita el almacenamiento de agua con capacidad para un periodo de reserva de 60 días.

Un gran aljibe no sería eficiente puesto que en épocas de sequía prolongadas el agua se evaporaría, por lo que se recomienda optar por un sistema que permite un almacenamiento de agua –hasta 25 l/m²– y añadir un depósito para almacenar los excedentes.

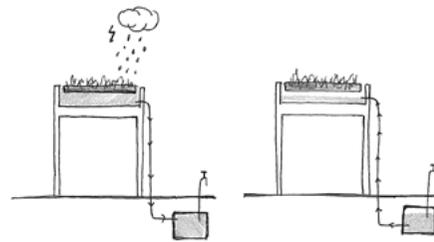


Figura 179. Cubierta plana vegetal en Zona C.

| La cubierta inclinada. Resultan idóneos los elementos precultivados para cubierta vegetal extensiva inclinada puesto que conviene disponer de una cubierta que almacene una leve cantidad de agua, ralentice la escorrentía y que a su vez permita una fácil evacuación de las lluvias torrenciales.

Se aconseja combinar este sistema de cubierta con un depósito enterrado que permita el almacenamiento del agua de lluvia para riego de la cubierta, ya que almacenar agua en cubierta no sería adecuado puesto que los periodos de lluvia coinciden con épocas de altas temperaturas y el agua se evaporaría fácilmente.

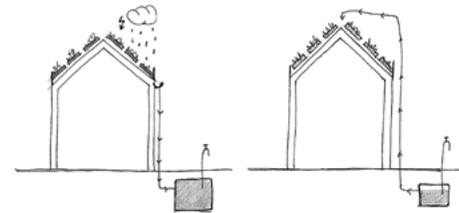


Figura 180. Cubierta inclinada vegetal en Zona C.

| La fachada vegetal. El sistema de celdas de polietileno para fachada vegetal es el más adecuado en estas condiciones. Está compuesto por celdas de polietileno con un pequeño aljibe en la parte inferior que permite que el agua de lluvia quede almacenada.

No obstante, es recomendable instalar un sistema de riego para épocas de sequía con circuito de recirculación de agua y nutrientes desde un depósito que almacene el agua recogida en la canaleta inferior.

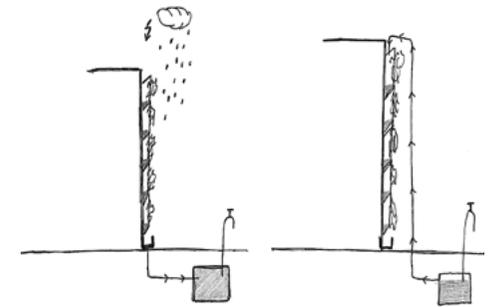


Figura 181. Fachada vegetal en Zona C.

5.6. Ejemplo representativo

El ejemplo que nos ocupa dispone de 1.992 m² de cubierta vegetal en el Complejo Balear de Investigación, Desarrollo e Innovación, un edificio de 10.142 m² diseñado por Tragsatec en el año 2010 y actualmente en ejecución (2015) que se encuentra en el Parc d'Innovació Tecnològica (Parc Bit), término municipal de Palma de Mallorca.

La solución constructiva propuesta consiste en una cubierta invertida ecológica formada por:

- | Una capa de arcilla expandida en seco con un espesor medio de 10 cm en formación de pendiente.
- | Una capa de 2 cm de mortero de cemento y arena de río 1/6 fratasado.

- | Una lámina separadora geotextil.
- | Una membrana impermeabilizante de caucho resistente a las raíces de 1,14 mm de espesor.
- | Uniones mediante proceso de junta rápida o junta de adhesivo de reticulación.
- | Un aislante térmico de poliestireno extruido de 5 cm de espesor.
- | Una placa drenante y de retención de agua.
- | Un sustrato compuesto, en iguales proporciones, por tierra vegetal procedente de la excavación y sustrato de elevada porosidad estable no inflamable y alta capacidad drenante procedente de producto reciclado.
- | Plantas tapizantes tipo Sedum con una densidad de 15 unidades por metro cuadrado.



Figura 182. Proceso constructivo de la cubierta vegetal del edificio Parc Bit, Palma de Mallorca.

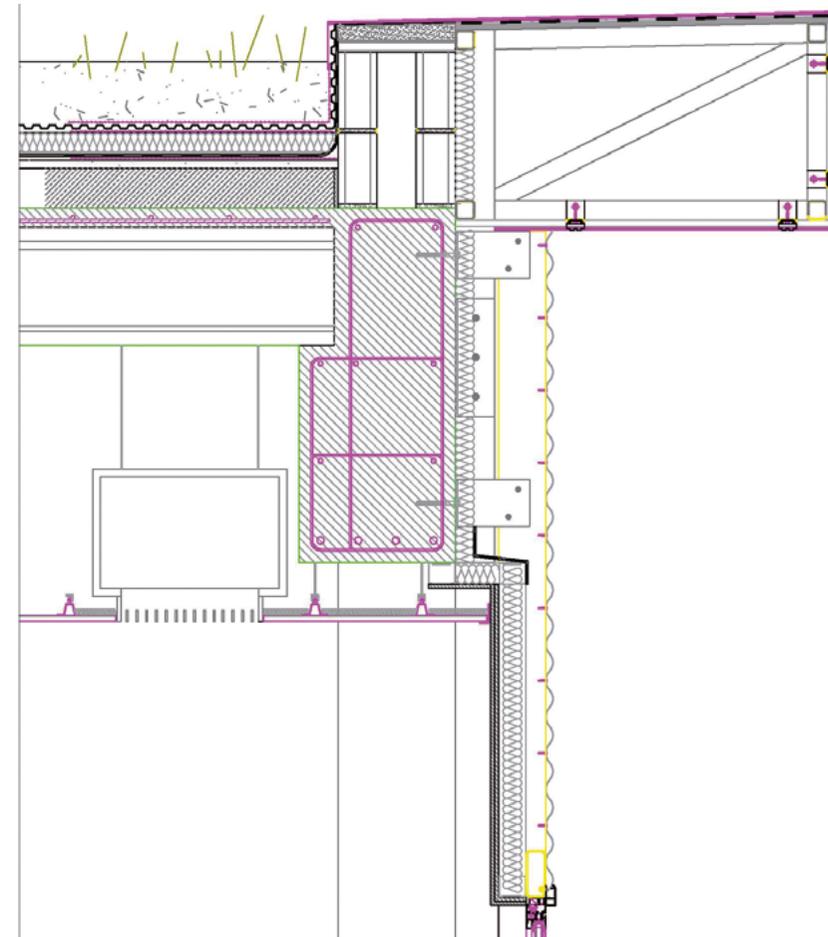


Figura 183. Detalle constructivo del edificio Parc Bit.

5.7. Ficha comparativa

Edificio de oficinas con 5.000 m² de superficie con una cubierta plana de 1.000 m² situado en

Zona climática B con una precipitación anual de 450 mm.

| | Características de la instalación | Coste de la instalación | Gestión y aprovechamiento del agua | Impacto ambiental |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>INSTALACIÓN ESTÁNDAR</p>  | <ul style="list-style-type: none"> - Cubierta plana tradicional de 20 cm de grava con 5 cm de poliestireno extruido, un fieltro geotextil y lámina impermeable de caucho EPDM. - Riego no necesario. | <p>Coste total de obra: 35.000 € (35 €/m², excluido soporte y formación pendiente)</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Sin aprovechamiento del agua de lluvia. - Vertido sobre cubierta: 360.000 l/año - Gasto indirecto en depuración: 266 €/año* - Consumo estándar energético por climatización y calefacción (5.000 m² × 200 kWh/(m² × año) × 0,18926 €/kWh): 189.260 €/año €*** | <ul style="list-style-type: none"> - Elevada necesidad de mantenimiento y reposición de los elementos de la cubierta debido a las variaciones de la temperatura. - Vertido directo a la red de saneamiento. - Impacto ambiental por el efecto "isla de calor". - Mayor consumo energético. |
| <p>CON APROVECHAMIENTO DE AGUA</p>  | <ul style="list-style-type: none"> - Cubierta vegetal extensiva con especies tipo Sedum, un sustrato de 10 cm, un fieltro geotextil, una lámina drenante retenedora, una capa de 5 cm poliestireno extruido, un fieltro geotextil y una lámina impermeable de caucho EPDM. - Riego estimado para vegetación con baja necesidad hídrica de 2 l/(m² × semana): 106.000 l/año. | <p>Coste total de obra: 5.000 € (55 €/m² excluido el soporte y la formación de pendiente).</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Gasto en riego: 130 €/año. - Ahorro anual por gasto indirecto en no depuración: 100 €/año*. - Ahorro anual estimado en climatización por la mejora del aislamiento con la cubierta vegetal (7 %): 13.200 €/año €** - Retorno del sobrecoste de la inversión: 1,8 años. | <ul style="list-style-type: none"> - Disminución de mantenimiento de cubierta por menores oscilaciones de temperatura en materiales. - Retención de la escorrentía, absorción y depuración del agua retenida. - Mejora ambiental por evapotranspiración. |

* Importe saneamiento y abastecimiento conforme a las tarifas del agua (AEAS). ** Importe conforme al grupo de trabajo de A3e. *** Según Europe's Energy portal.

5.8. Resumen

| Clasificación de cubiertas y fachadas vegetales | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------|--------------|------------|------------------|------------------------------------------|----------------|---------|
| | | | Peso saturado (kg/m ²) | Rehabilitado | Obra nueva | €/m ² | Retención de agua (l/m ²) | Zona climática | |
| Cubierta vegetal | Intensiva | Tipo aljibe | Con reserva de agua en lámina drenante | 360 | | | 180 | 113 | A, B |
| | | | Elevada sobre plots con aljibe | 914 | | | 120 | 130 | A, B |
| | | Sin almacenamiento de agua | Vegetación superficial | 180 | | | 150 | 68 | A |
| | Vegetación en elementos unitarios | | 390 | | | 109 | — | A | |
| | Extensiva | Cubierta plana | Sistema monocapa | 100 | | | 48 | 29 | A, B |
| | | | Sistema sencillo | 150 | | | 85 | 31 | A, B |
| | | | Sistema pequeño aljibe | 120 | | | 90 | 18 | A, B, C |
| | | | Sistema aljibe | 230 | | | 100 | 120 | A, B |
| | | | Sistema ultraligero | 35 | | | 90 | 31 | A, B |
| | | | Sistema de bandejas preplantadas | 50 | | | 80 | 15 | A, B, C |
| Sistema cubierta aljibe de elementos | | | 224 | | | — | — | A, B | |
| Cubierta inclinada | | Sistema para pendiente de 10 a 25° | 115-145 | | | 150 | 32-40 | A, B, C | |
| | | Sistema para pendiente > 25° | 155 | | | 200 | 64 | A, B | |
| | | Sistema monocapa | < 160 | | | 77 | 72 | A, B | |
| Huerto urbano | Sistema de cubiertas inclinada de teja | 100 | | | Elevado | — | A, B | | |
| | Sistema de bandejas prevegetadas | 40 | | | 130 | — | B, C | | |
| Fachada vegetal | Huerto urbano | Huertos superficiales | 380 | | | 67 | 3-5 | A, B, C | |
| | | Huertos en elementos unitarios | 100 | | | 120 | — | A, B, C | |
| | Sistema opaco | Sistema de cultivo hidropónico | 35 | | | 300 | — | A, B | |
| | | Sistema de celdas de polietileno | 85 | | | 350 | — | A, B | |
| | | Sistema de malla de polietileno con sustrato | 70 | | | 400 | — | A | |
| | | Sistema de jardineras de geotextil | 55 | | | 230 | Baja | A, B | |
| | | Sistema de gaviones con celda drenante | — | | | — | — | B, C | |
| | | Sistema de caja metálica con sustrato | — | | | — | — | B, C | |
| | | Sistema de celdas drenantes | — | | | — | — | B, C | |
| | Sistema traslúcido | Sistema tipo invernadero | — | | | — | — | — | |
| Sistema de paneles deslizantes | | — | | | — | — | — | | |

6. Aparcamientos

La generalización del tráfico rodado ha provocado un importante aumento de las superficies destinadas al uso aparcamiento, tanto en el ámbito urbano como en el rural. Los condicionantes morfológicos y espaciales hacen necesaria una clasificación que permita localizar las oportunidades y mejorar su diseño.

La suma de superficie asfaltada en carreteras más la superficie de todos los vehículos (30.855.969 vehículos en 2009, según el Instituto Nacional de Estadística) en España representa el 0,13 % de la superficie total (653 km² frente a 506.644 km²). Estas superficies de aparcamiento se construyen habitualmente con acabados impermeables de hormigón o asfalto.



Figura 184. Aparcamiento permeable.

6.1. Justificación

Los problemas que se derivan del exceso de impermeabilización son:

| **La escorrentía urbana.** Los aparcamientos con acabados impermeables anulan la capacidad de infiltración de agua y de evapotranspiración. Con precipitaciones intensas se incrementa la escorrentía superficial saturando las redes de alcantarillado y arrastrando los contaminantes depositados en suelo.

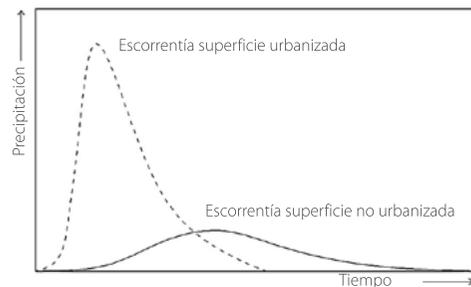


Figura 185. Escorrentía en superficie no urbanizada frente a superficie urbanizada.

| **La contaminación difusa.** En las áreas de aparcamientos se acumulan metales pesados, hidrocarburos y aceites que son arrastrados en periodos de tormenta deteriorando la calidad del agua que llega a las estaciones depuradoras. En el caso de suelos permeables este efecto debe corregirse interponiendo barreras de filtrado y depuración.



Figura 186. Contaminación difusa.

| **La desnaturalización.** Los aparcamientos impermeables representan una alteración sustancial del territorio preexistente, disminuyen la flora y fauna, modifican los parámetros de confort ambiental, empeoran la calidad de las aguas y favorecen la pérdida de cohesión del terreno. Además hacen necesarias infraestructuras para el transporte del agua y su tratamiento.



Figura 187. Impermeabilizando el suelo.

| **El efecto "isla de calor".** Tanto el asfalto como el hormigón tienen gran capacidad de absorción térmica y contribuyen significativamente al fenómeno "isla de calor", elevando la temperatura hasta 7 °C y dificultando la disipación nocturna del calor.

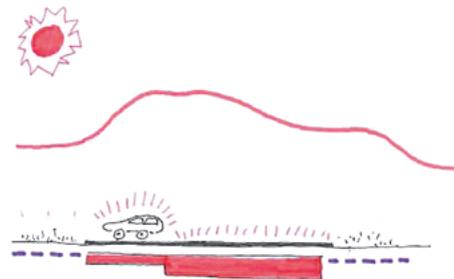


Figura 188. Isla de calor en aparcamientos.

| **La jerarquía superficial.** Las soluciones constructivas de gran rapidez de ejecución prevalecen y se utilizan aglomerados asfálticos o mezclas bituminosas impermeables sin diferenciar el pavimento, el vial de acceso y las zonas de estacionamiento.

Tampoco se utiliza vegetación o bandas vegetales vinculadas a la gestión del agua del propio aparcamiento que permiten mejorar las condiciones ambientales y la gestión del agua de la superficie asociada.

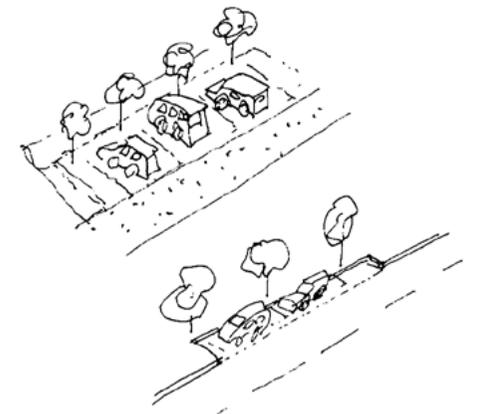


Figura 189. Jerarquización superficial.

6.2. Tipología

Diferenciamos entre aparcamientos superficiales y lineales, con ocupación permanente o temporal, y de alta o baja frecuencia de utilización.

Son permanentes los aparcamientos lineales situados en vías urbanas o los superficiales que dan servicio a instalaciones con funcionamiento continuado –como aeropuertos, estaciones de trenes, hoteles, etc.–. Son aparcamientos temporales aquellos de zonas vacacionales, viviendas rurales, zonas de oficinas, centros comerciales... En este tipo de aparcamiento el uso puede complementarse con otros como zona de juegos, mercados ambulantes, etc.

| Tipología de aparcamientos | | |
|----------------------------|--------------|------------|
| Morfología | Temporalidad | Frecuencia |
| Lineal | Permanente | Alta |
| | Permanente | Baja |
| Superficial | Permanente | Alta |
| | Permanente | Baja |
| | Temporal | Alta |
| | Temporal | Baja |

El aparcamiento lineal

Habitualmente esta localizado en vías rodadas urbanas, su área se dispone de forma lineal en paralelo con el área de tráfico rodado y permanece ocupado la mayor parte del tiempo

–su ocupación permanente y la frecuencia de renovación es alta–. La dimensión recomendada para cada plaza de aparcamiento es de 2,5 × 5,0 m.

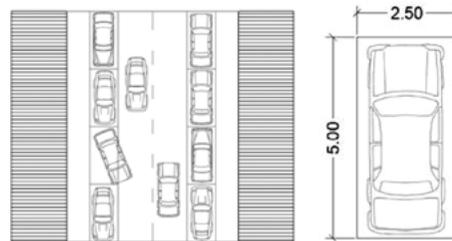


Figura 190. Aparcamientos lineales.

El aparcamiento superficial

Suelen ocupar superficies anexas a viales donde el tráfico rodado permanece separado de la vía principal. Cuentan con vías internas de tránsito y las diferencias en su diseño dependen de la frecuencia de utilización y su posible complementariedad con otros usos.

Los aparcamientos superficiales de ocupación permanente muestran habitualmente una organización más definida, diferenciándose claramente espacios de estacionamiento y zonas de tránsito, por el contrario, los de carácter temporal están menos definidos y pueden incluso variar la disposición de los vehículos optimizando el espacio en función de los requerimientos.



Figura 191. Aparcamientos superficiales.

| Acabado en zona de estacionamiento | | |
|------------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de acabado | | Material |
| Continuo | Impermeable | Hormigón impermeable Terrizo compacto impermeable Mortero acrílico o pintura acrílica Aglomerado asfáltico |
| | Permeable | Hormigón poroso Vegetación Terrizo compacto permeable Grava Mezcla bituminosa porosa convencional (B67/70) Mezcla bituminosa porosa modificada (BM-3b) |
| Discontinuo | Impermeable | Adoquín cerámico con junta sellada Adoquín de hormigón con junta sellada Baldosa de hormigón con junta sellada |
| | Permeable | Adoquín cerámico con junta abierta Adoquín de hormigón con junta abierta Baldosa de hormigón con junta abierta Pavimento plástico |

6.3. Elementos configuradores

Un aparcamiento se configura mediante tres elementos básicos principales:

La zona de estacionamiento. La resistencia de la capa de acabado dependerá de la temporalidad y frecuencia de uso. Se distinguen tres tipos de acabado para el firme del aparcamiento: con acabado superficial, con base granular y con terreno compactado.

La permeabilidad del terreno es también un factor de diseño que permite diferenciar los acabados del firme.

El acabado puede ser continuo con acabado homogéneo o discontinuo con piezas de pequeño tamaño cubriendo la superficie.

La utilización de cada tipo de firme depende de los niveles de permeabilidad característicos de cada acabado, de las propiedades de

resistencia al impacto y de la intensidad de la rodadura de vehículos a la que esté sometido.

La zona de circulación. En un aparcamiento lineal, la zona de circulación es la propia vía urbana, mientras que en un aparcamiento superficial son los viales internos. La necesidad de durabilidad y resistencia del firme es mayor en el aparcamiento lineal que en

el aparcamiento superficial debido a que la intensidad del tráfico rodado es mayor. El acabado permeable, vegetal o de granulometría fina –incluso confinados en celdas– son recomendables sólo en zonas de poco tránsito rodado.

La permeabilidad al agua, la resistencia al impacto y la rodadura de los vehículos completan los criterios de diseño.

| Zona de circulación en aparcamiento permanente o temporal con alta frecuencia de uso | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de acabado | | Material |
| Continuo | Impermeable | Hormigón impermeable Mortero acrílico o pintura acrílica Aglomerado asfáltico |
| | Permeable | Hormigón poroso Mezcla bituminosa porosa convencional (b67/70) Mezcla bituminosa porosa modificada (BM-3b) |
| Discontinuo | Impermeable | Adoquín de hormigón con junta sellada Baldosa de hormigón con junta sellada Adoquín cerámico con junta sellada |
| | Permeable | Adoquín de hormigón con junta abierta Baldosa de hormigón con junta abierta Adoquín cerámico con junta abierta |

| Zona de circulación en aparcamiento temporal con baja frecuencia de uso | | |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de acabado | | Material |
| Continuo | Impermeable | Hormigón Terrizo compacto impermeable Mortero acrílico o pintura acrílica Aglomerado asfáltico |
| | Permeable | Hormigón poroso Terrizo compacto permeable Mezcla bituminosa porosa convencional (b67/70) Mezcla bituminosa porosa modificada (BM-3b) |
| Discontinuo | Impermeable | Adoquín cerámico con junta sellada Adoquín de hormigón con junta sellada Baldosa de hormigón con junta sellada |
| | Permeable | Adoquín cerámico con junta abierta Adoquín de hormigón con junta abierta Baldosa de hormigón con junta abierta Pavimento plástico |

Los elementos auxiliares. La mejora de la gestión del agua y las condiciones de confort higrotérmico, acústico y estético, el tratamiento del agua y el incremento de la infiltración se consigue mediante los elementos auxiliares.

Su clasificación atiende a la morfología del aparcamiento (lineal o puntual), la permeabilidad, el acabado del firme y la incorporación de elementos vegetales.

Los elementos auxiliares del aparcamiento encaminados a la gestión del agua deben permitir la descontaminación del agua y su

infiltración al terreno o almacenamiento y uso posterior en riego o baldeo. En el caso de utilización del agua captada y acumulada se debe cumplir los parámetros establecidos en la normativa vigente (RD 1620/2007).

La inclusión de superficies auxiliares combinadas con las zonas de aparcamiento y circulación permiten mejorar básicamente la permeabilidad del conjunto y disminuir las necesidades de mantenimiento y riego, así como mejorar la calidad del agua y recuperar parte del ciclo natural del agua previo a la intervención.

| Elementos auxiliares | | | |
|------------------------------------|-----------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Morfología | Permeabilidad | Tipología constructiva | Incorpora vegetación |
| Lineal | Impermeable | Red de drenaje superficial | |
| | Permeable | Zanja drenante | Fitodepuración |
| Puntual | Impermeable | Red de imbornales a red subsuperficial | |
| | Permeable | Grava | Arbolado para la mejora de las condiciones ambientales: sombreado y evapotranspiración |
| | | Caucho | |
| | | Pavimento terrizo compacto | |
| | | Vegetado | |
| | | Adoquín cerámico con junta abierta | |
| | | Adoquín hormigón con junta abierta | |
| Baldosa cerámica con junta abierta | Mejora estética | | |
| Baldosa hormigón con junta abierta | | | |
| Baldosa pétreo con junta abierta | | | |

| Tratamiento de agua mediante elementos auxiliares | |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Tratamiento del agua | Permeabilidad del terreno |
| Especialización de capas | Pavimentos permeables |
| Separadores de hidrocarburos | Zonas permeables con vegetación |
| Fitodepuración | Zonas permeables con elementos acumuladores |

| Tratamiento de contaminación | |
|---------------------------------------------------------------|---------------|
| Método | Contaminación |
| Geotextiles separadores y acabado poroso del firme | Baja-media |
| Separador de hidrocarburos integrados en la red de evacuación | Media-alta |
| Fitodepuración con separador de hidrocarburos | Media-alta |

6.4. Condicionantes de diseño

La premisa fundamental respecto al agua de lluvia debe ser detener, ralentizar, transportar lentamente, infiltrar y acumular. Para ello se debe prestar atención a:

La permeabilidad superficial

Si el terreno no permite la infiltración y es necesario disponer de un firme impermeable, la evacuación del agua y su conducción a imbornales debe producirse lentamente, con pendientes que permitan la evacuación, e interponiendo zonas de almacenamiento temporal previas al vertido a la red. Por el contrario, si el terreno fuera permeable, el acabado superficial se centrará en conseguir la evacuación a zonas de retención e infiltración:

El firme permeable permite el paso del agua hasta una capa impermeable que la evacua a los colectores perimetrales. En estos casos, el firme es capaz de retener parte del agua de lluvia, ralentizando la escorrentía y disminuyendo el caudal pico.

En terreno permeable la infiltración puede realizarse a través de la superficie del aparcamiento –permeable en todas sus capas– o a través de elementos auxiliares como las bandas de vegetación, en cuyo caso la superficie del aparcamiento debe contar con una pendiente adecuada y orientada a esas zonas de infiltración.

| Estrategia de gestión en función de la permeabilidad del acabado superficial | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|--|----------------|
| Grado de permeabilidad | Estrategia de gestión de agua | | | |
| Impermeable | Evacuación del agua | Conducción perimetral | | Superficial |
| | | Conducción perimetral | | Subsuperficial |
| Permeable | Infiltración al terreno | Perimetral | | Continuo |
| | | Perimetral | | Discontinuo |
| | | Superficial | | |
| | Acumulación | Perimetral | | Continuo |
| | | Perimetral | | Discontinuo |
| | | Superficial | | |
| Acumulación e infiltración | Perimetral | Perimetral | | Continuo |
| | | Perimetral | | Discontinuo |
| | Superficial | Superficial | | |

La acumulación

Es recomendable que el agua recogida pueda ser transportada hasta zonas o depósitos de acumulación, pudiéndose utilizar elementos puntuales de almacenamiento o depósitos bajo la propia superficie del aparcamiento.



Figura 192. Aparcamientos con almacenamiento subsuperficial.

El terreno y el clima

Atendiendo a las características del terreno y la climatología, los condicionantes de diseño serán:

| | Diseño conforme al terreno y el clima | | |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| | Zona A | Zona B | Zona C |
| Terreno impermeable | Evacuación subsuperficial al terreno permeable y/o acumulación puntual | Acumulación puntual en perímetro | Evacuación subsuperficial a depósitos de acumulación |
| Terreno permeable | Infiltración controlada al terreno aumentando su capacidad drenante | Acumulación superficial o perimetral e infiltración controlada al terreno | Máxima acumulación e infiltración controlada al terreno |

La tipología

La tipología del aparcamiento determina diseños diferenciados:

| Diseño conforme a tipología | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aparcamiento lineal | Aparcamiento de superficie |
| <ul style="list-style-type: none"> – Terreno permeable: infiltración a través de firme permeable y lámina geotextil. – Terreno impermeable: primera capa permeable para la ralentización de la escorrentía. | Jerarquización de permeabilidades conforme al uso, peso de vehículos, estacionalidad y condiciones de terreno. |
| Mejora de las condiciones ambientales y de confort mediante vegetación, tanto aérea como en superficie según zonas y frecuencia de uso. | Inclusión de zonas vegetadas en superficie y de elementos vegetales para sombreado. |
| Incorporación de elementos puntuales de acumulación para riego, lavado o baldeo, interconectados si es posible. | Incorporación de zona de almacenamiento temporal o permanente, superficial o enterrado, según condicionantes y de áreas de tratamiento de agua por vegetación. |

6.5. Recomendaciones de diseño

Las diferentes zonas climáticas y la permeabilidad del terreno determinan la tipología del aparcamiento y el acabado superficial.

| | P. media (mensual) | P. media (anual) | P. máxima | P. mínima |
|--------|--------------------|------------------|-----------|-----------|
| Zona A | 79,14 | 949,72 | 357,86 | 0,50 |
| Zona B | 37,47 | 449,58 | 221,89 | 0,00 |
| Zona C | 32,92 | 395,05 | 304,64 | 0,00 |

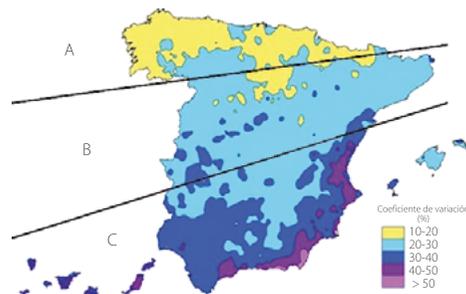


Figura 193. División geográfica según la variación de la precipitación.

Las principales estrategias a desarrollar en los aparcamientos vienen condicionadas por la problemática ocasionada por la falta de permeabilidad de sus firmes y por la ausencia generalizada de mecanismos que mejoren el tratamiento de aguas pluviales recogidas.

Por ello, las propuestas a realizar en este ámbito se centran en la mejora de las condiciones

ambientales, la disminución de la contaminación urbana, la ralentización de los problemas asociados a la escorrentía urbana y en la posibilidad de recargar los acuíferos mediante el uso del firme permeable en las zonas en las que la densidad del tráfico sea pequeña.

En el aparcamiento superficial, a diferencia de los sistemas lineales, sus mayores dimensiones favorecen la presencia de mecanismos de tratamiento de aguas pluviales que dependerán del nivel de contaminación asociado a la presencia de hidrocarburos.

En los casos de menor contaminación, bastará con la interposición de capas geotextiles que permitan el paso del agua y eviten el de las partículas contaminantes, siendo posible la utilización de pavimento permeable que permita la retención y biorremediación de los hidrocarburos. En los casos con drenajes lineales se recomienda incluir separadores de hidrocarburos que permitan la descontaminación del agua tratada. En los casos con mayor frecuencia de utilización del aparcamiento será necesaria la incorporación de sistemas de biorremediación a través de macrofitas.

A continuación se realiza un análisis con mayor detalle de las posibles estrategias a desarrollar en algunas de las tipologías de aparcamiento superficial.

Para ello, se ha realizado un análisis particularizado en función de las zonas de intervención, dependiendo principalmente del nivel de permeabilidad del firme y del volumen de precipitaciones de la zona de propuesta.

Criterios en Zona climática A con terreno impermeable

Esta zona de estudio se caracteriza por la presencia de precipitaciones frecuentes de gran intensidad y terrenos impermeables. Por ello, las principales estrategias de gestión del agua de lluvia se centrarán en su evacuación, tanto a terrenos permeables cercanos como a otros elementos auxiliares asociados a la vegetación, donde además pueda ser necesaria su acumulación.

En todos los casos, será necesario tener en cuenta el tratamiento de las aguas para evitar tanto la contaminación del terreno como la de aquella que es almacenada para su uso posterior.

En función de estas estrategias, se detallan a continuación algunas soluciones:

| La evacuación subsuperficial del agua a zonas permeables cercanas. En aquellas zonas donde no sea posible la incorporación de vegetación y la dureza del terreno sea tal que no sea rentable su perforación, pero se

cuenta con zonas permeables cercanas, se recomienda plantear un sistema de aparcamiento permeable con evacuación subsuperficial del agua.

De esta forma conseguimos la conducción del agua a zonas donde es posible la infiltración y el aumento de la capacidad de absorción de aquellos firmes sobre terrenos no permeables.

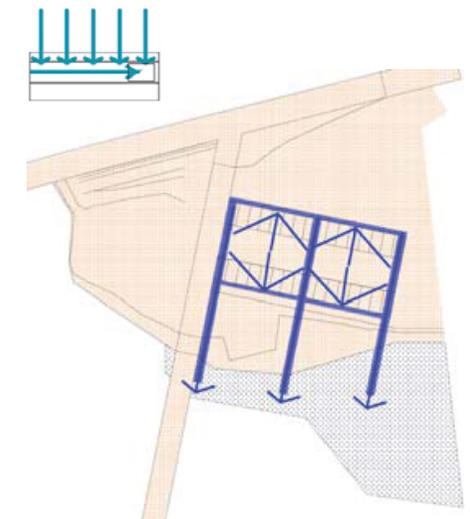


Figura 194. Sistema permeable con evacuación subsuperficial del agua a terreno permeable.

La acumulación del agua asociada a zonas perimetrales auxiliares vegetales y la conducción del resto a zonas permeables cercanas. En aquellos terrenos en los que sea posible la incorporación de vegetación, pero que cuenten con terrenos permeables cercanos, se recomienda una estrategia combinada en la que una parte del agua sea acumulada en áreas auxiliares perimetrales asociadas a la vegetación y el resto sea conducida a las áreas permeables cercanas para su infiltración al terreno.

En este caso se consigue disminuir el mantenimiento de las áreas vegetales especial-

mente en las estaciones más secas y la evacuación de gran parte del volumen de agua de lluvia captada para su posible infiltración. Además se aumenta la capacidad de absorción de los firmes sobre terrenos no permeables.

La acumulación del agua asociada a zonas puntuales auxiliares vegetales. En aquellos terrenos impermeables que no cuenten con un área permeable cercana se recomienda la incorporación de áreas auxiliares puntuales de carácter permeable y asociadas a la vegetación.

El agua es conducida a las áreas de acumulación a través de firmes permeables con evacuación subsuperficial. Estas áreas puntuales pueden ser recomendables en terrenos de gran dureza y en aquellos diseños que optimicen el sombreado de las áreas de aparcamiento mediante la incorporación de vegetación de mediano y gran porte.

De esta manera se consigue disminuir el mantenimiento de las áreas vegetadas en las estaciones más secas y se mejora la capacidad de absorción de aquellos firmes sobre terrenos no permeables.

Crterios en Zona climática A con terreno permeable

Esta zona de estudio se caracteriza por la presencia de precipitaciones frecuentes con gran intensidad y terreno permeable. Por ello, la estrategia de gestión del agua se centra en la infiltración al terreno y el aumento de su capacidad de absorción a través del diseño de capas más porosas.

En función de esta estrategia, se detallan a continuación las soluciones recomendadas:

La infiltración superficial al terreno combinada con acumulación perimetral asociada a vegetación. En las zonas en las que el terreno es suficientemente permeable se recomienda una solución combinada de firme permeable con filtración superficial al terreno y acumulación perimetral asociada a la vegetación, disminuyendo la necesidad de riego en periodos de escasas precipitaciones. De este modo, se consigue mantener el nivel de humedad en el terreno disminuyendo el fenómeno de "isla de calor" y los problemas de contaminación asociados a la escorrentía urbana y los caudales pico.

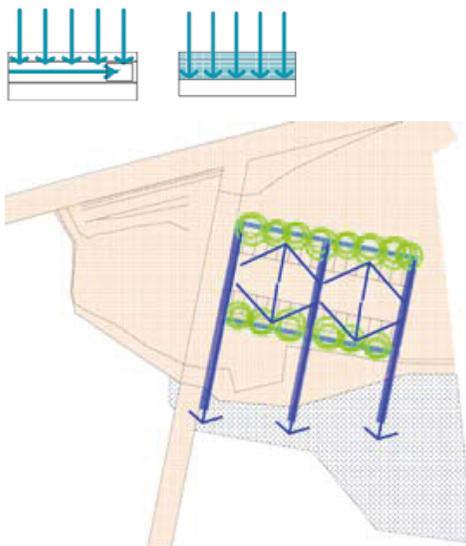


Figura 195. Sistema permeable con evacuación subsuperficial del agua a terreno permeable, con acumulación perimetral asociada a la vegetación.

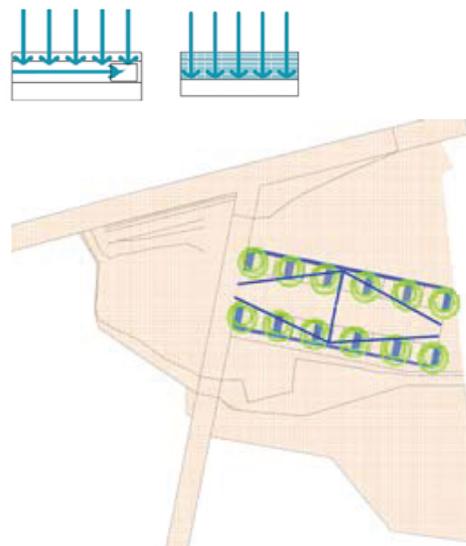


Figura 196. Sistema permeable con evacuación subsuperficial del agua y con acumulación puntual asociada a la vegetación.

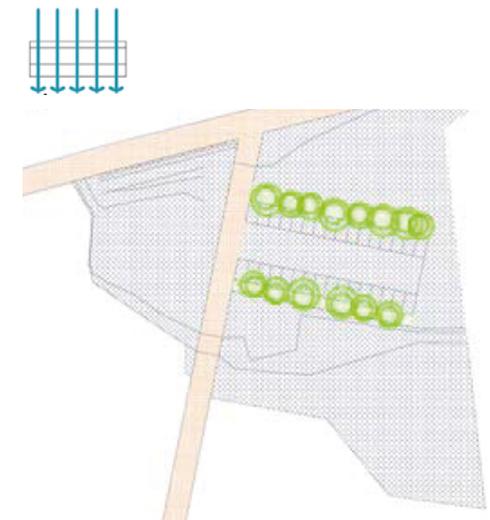


Figura 197. Sistema permeable con infiltración superficial al terreno y acumulación perimetral asociada a la vegetación (posibilidad de aumentar la capacidad de absorción del terreno).

Criterios en Zona climática B con terreno impermeable

Esta zona de estudio se caracteriza por la presencia de precipitaciones esporádicas con intensidad media y terreno impermeable. Se recomienda la acumulación perimetral o puntual del agua de lluvia para su uso posterior en el riego o el baldeo y la incorporación de zonas de sombra y de vegetación autóctona. Por ello, la principal estrategia de gestión de agua se centra en la acumulación perimetral o puntual asociada a uso posterior.

En función de esta estrategia, se detallan a continuación las soluciones recomendadas:

| La evacuación subsuperficial a áreas de acumulación perimetrales asociadas a la vegetación apoyada con sistemas de acumulación puntuales de mayor volumen.

En zonas con terreno impermeable se recomienda la incorporación de áreas auxiliares perimetrales de carácter permeable asociadas a la vegetación y la incorporación de firme permeable con evacuación subsuperficial que conduzcan el agua hacia las áreas de acumulación. Además, se puede contar con sistemas de acumulación puntuales de mayor capacidad que los sistemas perimetrales que permitan el uso de agua en épocas de menor frecuencia de precipitaciones.

De este modo se consigue aumentar la capacidad de absorción de aquellos firmes sobre terrenos no permeables y permitir la acumulación de agua de lluvia para el riego,

el baldeo o el lavado en periodos en los que las precipitaciones son menores.

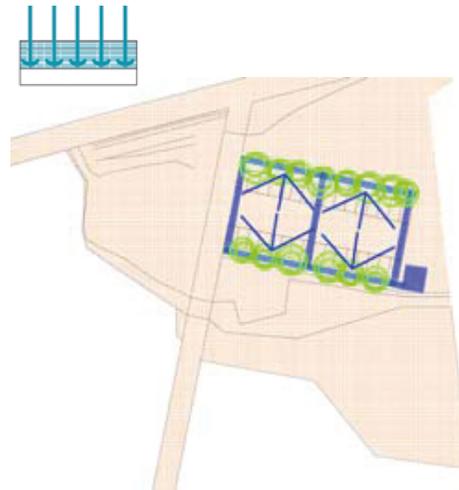


Figura 198. Sistema permeable con acumulación perimetral asociada a la vegetación y depósitos de acumulación puntuales asociados a riego y lavado.

| La evacuación subsuperficial a áreas de acumulación puntuales asociadas a la vegetación.

En zonas de terrenos impermeables se recomienda la incorporación de elementos puntuales auxiliares de carácter permeable y asociados a la vegetación.

Al igual que en el caso anterior se consigue aumentar la capacidad de absorción del firme sobre terreno no permeable y permitir la acumulación de agua de lluvia para su uso futuro.

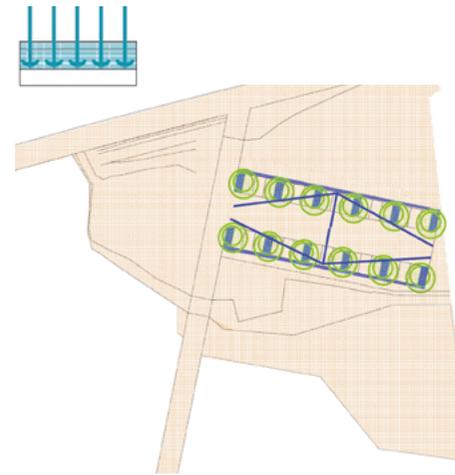


Figura 199. Sistema permeable con acumulación puntual asociada a vegetación.

Criterios en Zona climática B con terreno permeable

Esta zona de estudio se caracteriza por la presencia de precipitaciones esporádicas con intensidad media y terrenos permeables. La principal estrategia de gestión de agua se centra en su acumulación perimetral o puntual asociada a usos de riego, baldeo o lavado. Dado el carácter esporádico de las precipitaciones se puede plantear un volumen de acumulación mayor que en otras situaciones, centrándose no sólo en el área auxiliar de vegetación sino también bajo la superficie de aparcamiento.

En función de estas estrategias, se detallan a continuación las soluciones recomendadas:

| La infiltración superficial al terreno y la acumulación perimetral asociada a la vegetación.

En aquellas zonas en las que el terreno es suficientemente permeable se recomienda una solución combinada de firme permeable para infiltración superficial al terreno y sistemas de acumulación perimetral asociados a la vegetación y a las áreas de aparcamiento, disminuyendo así la necesidad de riego en periodos de escasas precipitaciones.

De este modo se consigue mantener el nivel de humedad en el terreno, disminuyendo el fenómeno "isla de calor" y los problemas de contaminación asociados a la escorrentía urbana y los caudales pico.

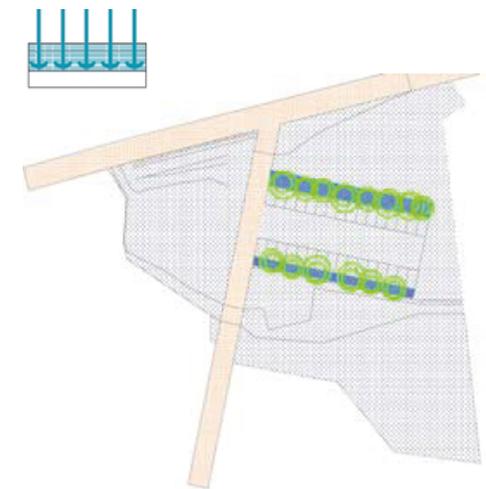


Figura 200. Sistema permeable con acumulación perimetral asociada a vegetación.

Criterios en Zona climática C con terreno impermeable

Esta zona de estudio se caracteriza por la presencia de precipitaciones esporádicas con gran intensidad y terrenos impermeables. Por ello, la principal estrategia de gestión de agua se centra en la utilización de firme permeable que mediante evacuación subsuperficial conduce el agua a grandes depósitos de acumulación para su reutilización en riego, lavado o baldeo.

En función de estas estrategias, se detallan a continuación las soluciones recomendadas:

| La acumulación de agua en depósitos perimetrales de gran volumen asociados a la vegetación, riego, lavado o baldeo de áreas transitables. En aquellas zonas con terreno impermeable se recomienda la incorporación de áreas auxiliares perimetrales de carácter permeable y asociadas a la vegetación.

Debido a la gran intensidad de las precipitaciones en periodos muy concretos se recomienda la conducción del agua a depósitos de gran volumen en aquellos casos en los que el agua pueda ser reutilizada para riego, lavado o baldeo de áreas transitables.

De este modo se consigue aumentar la capacidad de absorción de aquellos firmes sobre terreno no permeable y permitir la acumulación de agua de lluvia para riego o lavado en periodos en los que las precipitaciones sean menores.

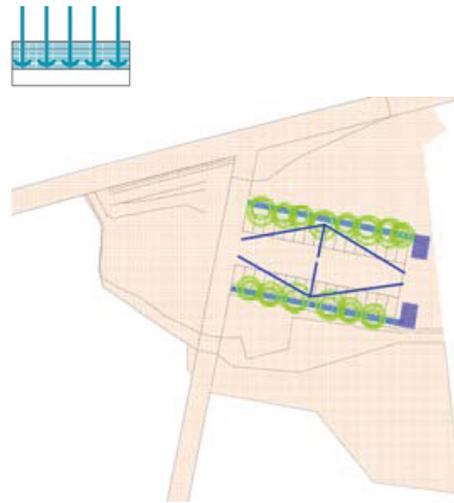


Figura 201. Sistema permeable con evacuación subsuperficial a depósitos puntuales para riego y lavado.

Criterios en Zona C con terreno permeable

Esta zona de estudio se caracteriza por la presencia de precipitaciones esporádicas con gran intensidad y terreno permeable. Por ello, la principal estrategia de gestión de agua se centra en la combinación de medidas de acumulación e infiltración al terreno.

En función de estas estrategias, se detallan a continuación algunas soluciones recomendadas:

| La acumulación de agua combinada con infiltración al terreno asociada a elementos perimetrales. En aquellas zonas en las

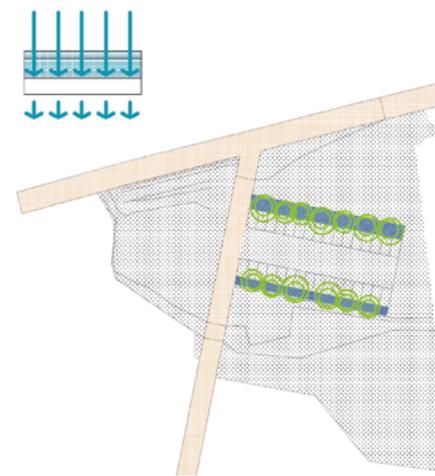


Figura 202. Sistema permeable con acumulación e infiltración al terreno, asociado a superficies vegetadas y zonas de aparcamiento con infiltración al terreno.

que el terreno es suficientemente permeable se recomienda una solución combinada de acumulación con infiltración al terreno a través de la disposición de capas de diferentes porosidades, intercaladas por láminas geotextiles que regulen el paso del agua a estratos inferiores y que eviten la infiltración de elementos contaminantes.

Esta solución propone que la zona de acumulación y de filtración estén vinculadas con el área auxiliar perimetral asociada a vegetación, mientras que el resto del firme es permeable y permite la infiltración directa al terreno.

De este modo se alcanzan los objetivos de mantener el nivel de humedad en el terreno y la acumulación de agua para usos posteriores de riego, disminuyendo el fenómeno "isla de calor" y los problemas de contaminación asociados a la escorrentía urbana y los caudales pico.

6.6. Ejemplo representativo

Aparcamiento superficial de uso permanente situado en Zona B con terreno permeable.

Consideraciones específicas

Se recomienda proteger la zona de los vientos predominantes con elementos vegetales, orientar los viales internos de forma que eviten el deslumbramiento por el sol a baja altura y seleccionar la vegetación para conseguir sombra en las zonas de estacionamiento.

Los elementos auxiliares –especialmente vegetales– están asociados a los sistemas de acumulación de agua. La acumulación de agua de lluvia debe realizarse en construcciones auxiliares como balsas o charcas integradas paisajísticamente en el entorno y se recomienda emplear materiales de larga durabilidad y la selección de especies vegetales autóctonas.

La zona de estacionamiento

El terreno se debe compactar para garantizar la durabilidad del conjunto e incluso puede ser mejorado con aporte de tierra de mejor calidad. Sobre el terreno compactado se coloca la capa impermeabilizante con una pendiente superior al 2 % que permite la conducción del agua hacia la zona de acumulación y su posterior vertido hacia zonas auxiliares de vegetación.

La evacuación subsuperficial del agua se consigue utilizando una base granular porosa sobre

lámina impermeabilizante protegida con lámina geotextil. Otra solución recomendada es la utilización de celdas drenantes envueltas con lámina geotextil. La base granular recomendada está formada por grava compactada de 15 a 25 mm de diámetro con un espesor de 20 a 25 cm.

La capa de acabado se realiza mediante elementos rectangulares prefabricados de hormigón con bordes redondeados de dimensiones 60 × 18 × 8 cm y junta abierta rellena de tierra vegetal o grava que apoya sobre una cama de arena de 8 cm confinada en una lámina geotextil que impide la pérdida de arena entre la grava y que favorece el mantenimiento de la humedad en las capas superiores.

Una alternativa para la capa de acabado es la utilización de rejillas plásticas que contengan vegetación o grava con espesores entre 20 y 30 mm. Para la selección del relleno se debe tener en cuenta la frecuencia de utilización del aparcamiento y de las precipitaciones.

Los elementos auxiliares de acumulación asociados a la vegetación

En este caso el agua captada en la zona de aparcamiento se conduce mediante evacuación subsuperficial a las áreas auxiliares de acumulación asociadas a la vegetación. Estos elementos con forma de franja tienen un an-

cho de al menos 1,20 m para el correcto crecimiento del arbolado autóctono. Como sistema de almacenamiento de agua se utilizan celdas drenantes plásticas de polipropileno envueltas en geotextil con un espesor acorde a la vegetación implantada y al uso de riego o baldeo que se pretenda realizar.

Sobre el terreno se coloca una capa impermeable con protección antirraíces, las celdas de polipropileno se colocan sobre una cama de arena y el resto se rellena también con arena.

Para la selección de las especies se debe tener en cuenta que las de bajo porte contribuyen a retener el agua superficial y las de gran porte favorecen el sombreado y ayudan a mantener la humedad. Además, se debe prestar atención a la profundidad de las raíces respetando la distancia de crecimiento entre árboles y las celdas de almacenamiento.

El área de circulación de vehículos

El agua se debe infiltrar directamente al terreno siempre que sea posible y se recomienda la utilización de asfalto poroso en el acabado superficial. Tras el primer acondicionamiento y compactación del terreno se dispone una subbase granular de grava de 15 a 25 mm con un espesor de 20 a 25 cm que permite la infiltración directa al terreno. Como elemento de acabado continuo se recomienda utilizar una

mezcla bituminosa porosa modificada con polímeros (BM-3b).

El tratamiento de agua

Para el tratamiento del agua se recomienda añadir dos sistemas de tratamiento previo a la infiltración: una lámina geotextil colocada entre materiales porosos, un sistema complementario de tratamiento compuesto por un separador de hidrocarburos al final de la red de evacuación de pluviales y un sistema de fitodepuración por flujo subsuperficial con vegetación específica para biorremediación de metales pesados. Previo al separador de hidrocarburos se dispone de una reja de desbaste. El agua separada se conduce al sistema vegetal complementario enraizado en grava donde se favorece el crecimiento de las raíces y de las bacterias aerobias que permiten la degradación de las partículas contaminantes.

La evacuación de aguas pluviales en caso de tormenta

Se recomienda la construcción de una red independiente de canales superficiales protegidos por una rejilla metálica dispuestos en los encuentros entre los elementos auxiliares asociados a la vegetación y a las áreas de aparcamiento. Esta red actúa como rebosadero en caso de tormenta y vierte a una zona específica con capacidad suficiente o a la red de saneamiento.

El mantenimiento

El pavimento discontinuo tiene riesgo de colmatación en sus juntas, por lo que se coloca en zonas donde puedan recibir un mantenimiento adecuado y donde la humedad y pluviometría sean suficientes para mantener la vegetación durante todo el periodo del año.

El pavimento permeable continuo presenta buena capacidad de laminación y facilidad de limpieza superficial, por lo que se recomienda para grandes superficies con un mantenimiento escaso, pero siempre en combinación con elementos auxiliares asociados a la vegetación. El derrame de aceites e hidrocarburos debe limpiarse periódicamente.

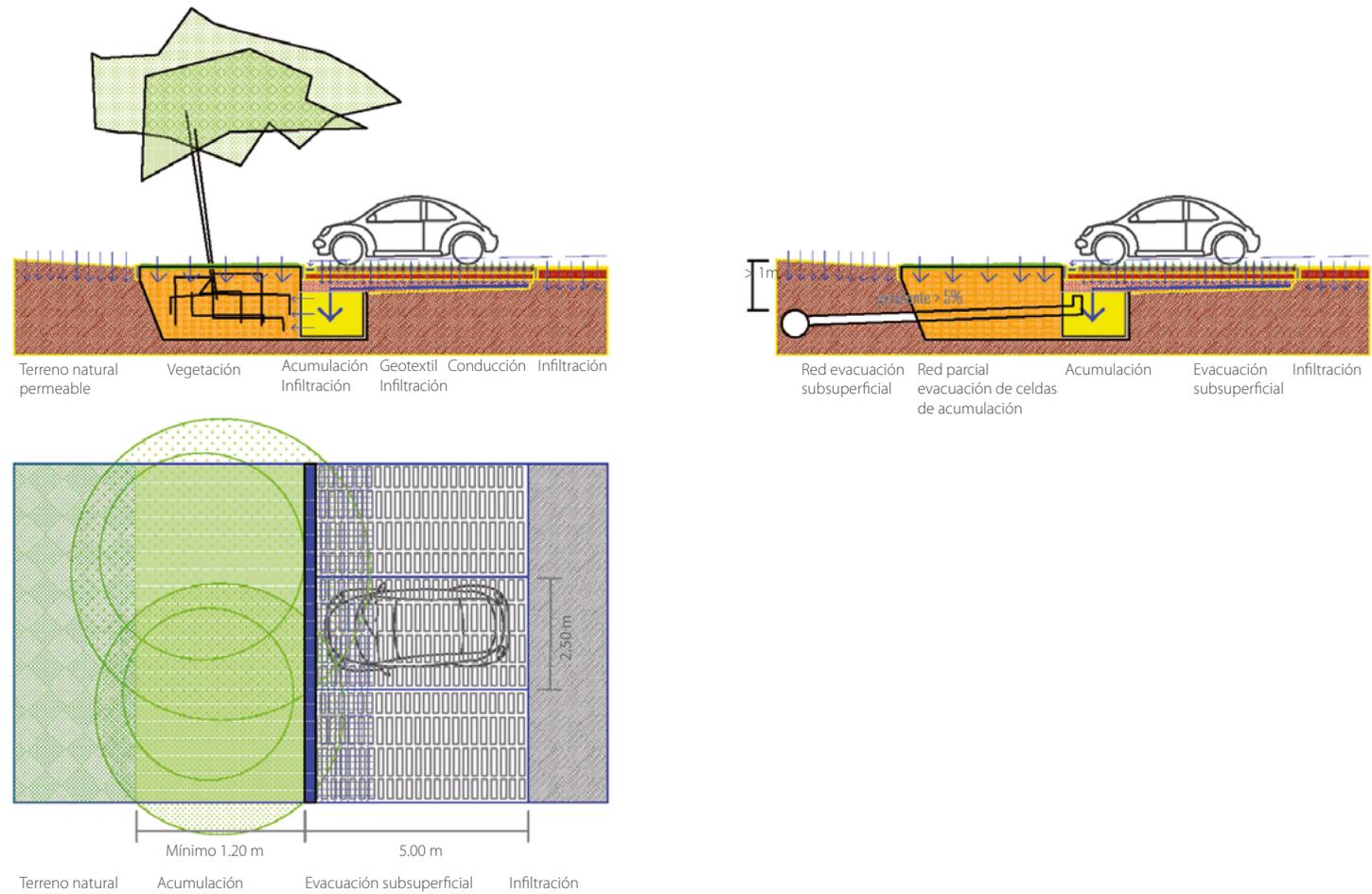
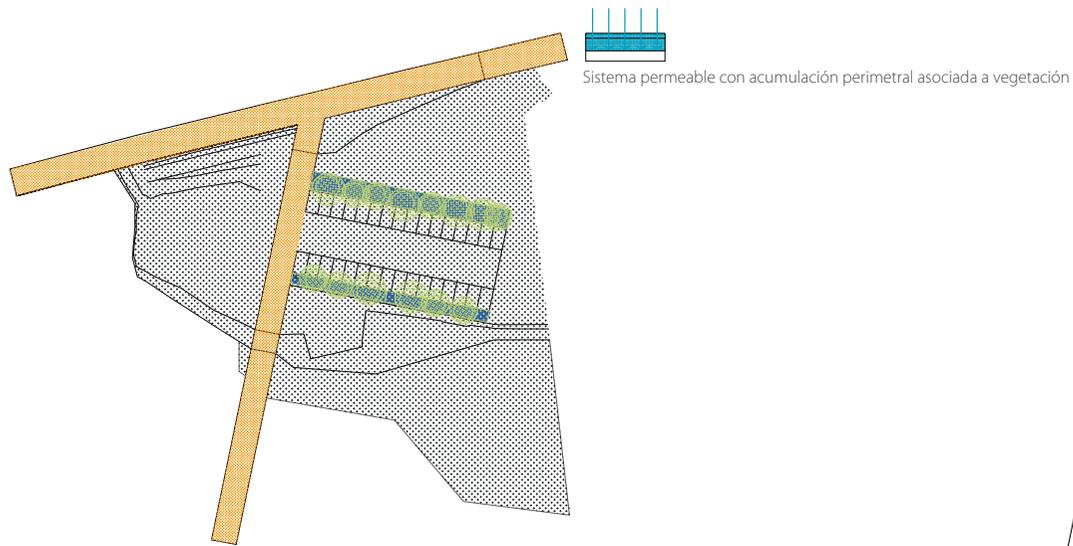


Figura 203. Ejemplo de aparcamiento con vertido a elemento auxiliar vegetado y a red de evacuación subsuperficial.



Régimen de lluvias normal

Agua de lluvia → Firme permeable con evacuación subsuperficial → Conducción a celdas drenantes de acumulación

Periodo de tormenta

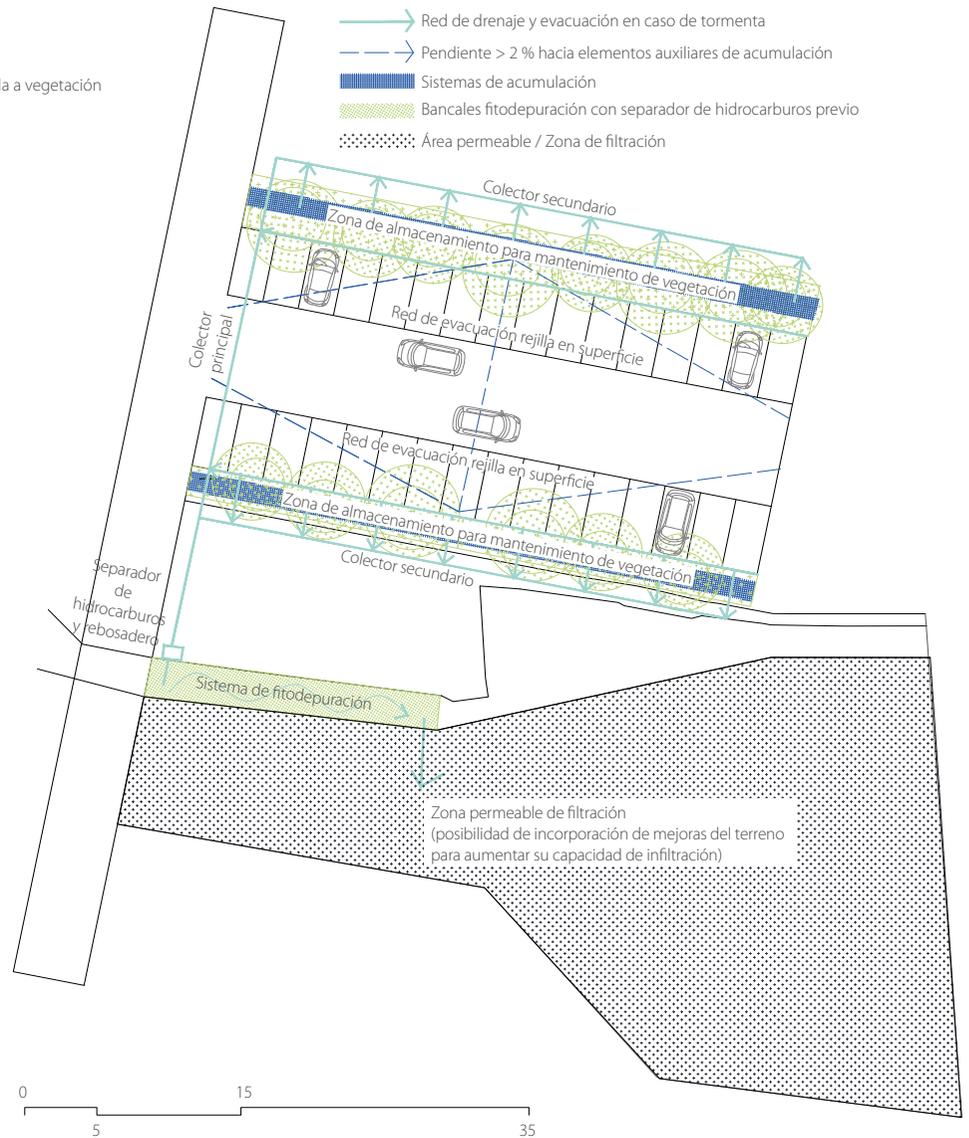
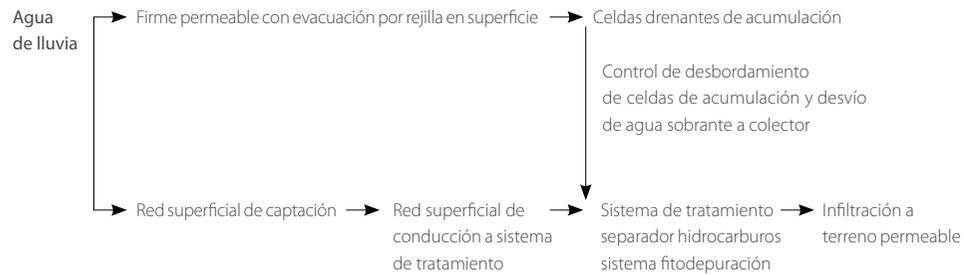


Figura 204. Esquema de aparcamiento.

Estimación del coste orientativo de las medidas a implantar, incluyendo los costes de acondicionamiento del terreno y excluyendo el coste de la vegetación.

| Material | Dimensiones | | | Precio unitario | Unidad | Precio |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------|------|-----------------|------------------|-----------|
| Área de aparcamiento (precio para una plaza de 2,5 x 5,0 m) | | | | | | |
| Acondicionamiento del terreno | 2,50 | 5,00 | 0,40 | 59,20 | €/m ³ | 296,00 € |
| Pavimento con adoquín de hormigón sobre lecho de arena de 8 cm de espesor | 2,50 | 5,00 | 0,15 | 22,91 | €/m ³ | 286,38 € |
| Lámina de geotextil con fieltro de polipropileno | 2,50 | 5,00 | — | 1,22 | €/m ³ | 15,25 € |
| Capa de grava de 15 a 25 mm de espesor | 2,50 | 5,00 | 0,20 | 17,14 | €/m ³ | 42,85 € |
| Lámina impermeabilizante | 2,50 | 5,00 | — | 13,70 | €/m ³ | 171,25 € |
| Área de tránsito (precio para una plaza de 2,5 x 5,0 m) | | | | | | |
| Acondicionamiento del terreno | 2,50 | 5,00 | 0,40 | 59,20 | €/m ³ | 296,00 € |
| Mezcla bituminosa en caliente (b60/70), porosa de tipo grueso G-25 con árido calizo y espesor de 5 cm | 2,50 | 5,00 | — | 3,05 | €/m ³ | 38,12 € |
| Grava 15-25 mm | 2,50 | 5,00 | 0,20 | 17,14 | €/m ³ | 42,85 € |
| Área de acumulación (precio para una plaza de 2,5 x 5,0 m) | | | | | | |
| Acondicionamiento del terreno | 2,50 | 5,00 | 1,00 | 59,20 | €/m ³ | 740,00 € |
| Celda de acumulación polipropileno de 1 m ³ (45 x 40 x 68 cm) | 2,50 | 0,68 | | 120,00 | €/m ³ | 204,00 € |
| Capa de arena | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 17,48 | €/m ³ | 273,125 € |
| Lámina de geotextil con fieltro de polipropileno | 2,50 | 5,00 | | 1,22 | €/m ³ | 15,25 € |
| Lámina impermeabilizante | 5,00 | 0,80 | | 13,70 | €/m ³ | 54,80 € |
| | 5,00 | 1,36 | | 13,70 | €/m ³ | 93,16 € |
| | 2,40 | 2,50 | | 13,70 | €/m ³ | 82,20 € |



Figura 205. Diferentes acabados superficiales.

6.7. Ficha comparativa

Aparcamiento estacional de 1.800 m² de superficie con una capacidad de 90 plazas situado en Zona climática A con una precipitación anual de 950 mm.

| | Características de la instalación | Coste de la instalación | Gestión con aprovechamiento de agua | Impacto ambiental |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>INSTALACIÓN ESTÁNDAR</p>  | <ul style="list-style-type: none"> – Aparcamiento asfalto estándar. – Acabado asfáltico continuo. – Sub base de zahorra de 25 cm. – Terreno compactado. | <ul style="list-style-type: none"> – Asfaltado: 25 €/m² (excluidas canalizaciones). – Coste total estimado de obra: 37.500 €. | <ul style="list-style-type: none"> – Riego no necesario. – Aprovechamiento de agua = 0 l. – Vertido a red general = 1.539.000 l/año (gasto depuración 815 €/año). | <ul style="list-style-type: none"> – Nula amortiguación de vertido de agua a saneamiento. – Elevado coeficiente de escorrentía asfalto 0,90. – Concentraciones de escorrentía. – Notables variaciones de temperatura por acabado superficial (isla de calor). – Ausencia de sombras. – Imposibilidad de otros usos. – Espacio inutilizado fuera de temporada. |
| <p>CON APROVECHAMIENTO DE AGUA</p>  | <ul style="list-style-type: none"> – Aparcamiento permeable jerarquizado. – Viales: zahorra sobre terreno compactado. – Estacionamiento: vegetación en pavimento modular drenante. | <ul style="list-style-type: none"> – Vial: 7.750 € (11,48 €/m² × 675 m²) – Estacionamiento: 16.875 € (15 €/m² × 1.125 m²) – Coste estimado total: 24.625 € (excluidas las canalizaciones) | <ul style="list-style-type: none"> – Ahorro por no depuración: 545 €/año* | <ul style="list-style-type: none"> – Amortiguación temporal de escorrentía y vertido a saneamiento (retención de 30 % de precipitación independiente del almacenamiento). – Temperatura amortiguada. – Mantenimiento. – Mejora ambiental de entorno. – Espacio verde o de uso libre polivalente. – Reducción isla de calor. |

*Importe saneamiento y abastecimiento conforme a tarifas del agua (AEAS).

6.8. Resumen

| Estrategia por zona climatológica y permeabilidad del terreno | | | |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Zona A | Zona B | Zona C |
| Permeable | Infiltración al terreno (aumento de la capacidad de absorción del terreno) | Acumulación perimetral y superficial (riego/baldeo) | Acumulación para riego, lavado o baldeo e infiltración al terreno |
| Impermeable | Firme permeable y evacuación subsuperficial a terreno permeable o acumulación puntual | Firme impermeable con acumulación perimetral o puntual para riego, lavado o baldeo | Firme permeable con evacuación subsuperficial a depósitos de acumulación para riego, lavado o baldeo |



Figura 206. Aparcamiento permeable.

| Elementos auxiliares | | | Tipo de vegetación |
|---------------------------------------|-------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lineales | Impermeable | Red de drenaje superficial | Fitodepuración y arbolado para la mejora del confort por sombreado y control higrotérmico |
| | Permeable | Zanja drenante | |
| Puntuales | Impermeable | Red de imbornales a red subsuperficial | |
| | Permeable | Grava | |
| | | Caucho | |
| | | Pavimento de terrazo compacto | |
| | | Vegetación | |
| | | Adoquín cerámico con junta abierta | |
| Adoquín de hormigón con junta abierta | | | |
| Baldosa cerámica con junta abierta | | | |
| Baldosa de hormigón con junta abierta | | | |
| Baldosa pétreo con junta pétreo | | | |



Figura 207. Aparcamiento con elementos auxiliares vegetados.

Resumen de acabado según el tipo de pavimento

| Acabado en aparcamiento | | Aparcamiento de baja frecuencia | Aparcamiento de alta frecuencia | Circulación de baja frecuencia | Circulación de alta frecuencia | |
|-------------------------|--------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Continuo | Impermeable | Hormigón | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | | Terrizo compacto impermeable | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | | Mortero acrílico o pintura acrílica | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | | Aglomerado asfáltico | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Permeable | Hormigón poroso | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | | Vegetación | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | | Terrizo compacto impermeable | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | | Grava | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | | Mezcla bituminosa porosa convencional (b67/79) | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | | Mezcla bituminosa porosa modificada (BM-3b) | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Discontinuo | Impermeable | Adoquín cerámico con junta sellada | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| | | Adoquín de hormigón con junta sellada | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| | | Baldosa de hormigón con junta sellada | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| | Permeable | Adoquín cerámico con juntas | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | | Adoquín de hormigón con junta abierta | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | | Baldosa de hormigón con junta abierta | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Pavimento plástico | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |

7. Vialidad invernal

El equipamiento de vialidad invernal tiene como objetivo mantener los viales y zonas urbanas en buenas condiciones de circulación cuando la climatología invernal es adversa por acumulación de nieve o hielo en la carretera.

La actual estrategia de actuación se centra en mantener la superficie húmeda y limpia durante los episodios adversos y aprovisionar de espacios de refugio a los conductores, especialmente de vehículos pesados que pudieran quedar atrapados. Para ello se construyen almacenes de equipos, materiales fundentes y grandes áreas de aparcamientos de emergencia.



Figura 208. Aparcamiento de vialidad invernal en El Molar, Madrid.

7.1. Justificación

La campaña de vialidad invernal 2010-2011 contó con 1.312 quitanieves de empuje (79 más que en la campaña anterior), 35 quitanieves dinámicas, 302 almacenes de fundentes, 430 silos (26 más que en la campaña anterior), 216.039 toneladas de capacidad de almacenamiento de fundentes y los consumos medios previstos eran de 225.000 toneladas de cloruro sódico (10.300.000 €) y 80.000 m³ de salmuera (1.400.000 €), según los datos del Ministerio de Fomento.

Los problemas que pueden derivarse de estas actuaciones se deben al exceso de impermeabilización, la desnaturalización del terreno, la contaminación del suelo y la contaminación del acuífero.

El exceso de impermeabilización y la desnaturalización del terreno

La construcción de grandes superficies en las que prima el uso de materiales impermeables como el asfalto y el hormigón provoca la pérdida de capacidad de infiltración al terreno, la eliminación de la evapotranspiración, el incremento

de la escorrentía superficial, la concentración de contaminantes y la erosión del suelo en las zonas de vertido.

Los aparcamientos de emergencia de uso intrínsecamente esporádico modifican grandes superficies desnaturalizando los ecosistemas preexistentes.

La contaminación del suelo y el acuífero

La disolución de la sal en el agua de deshielo pasa directamente al suelo y al acuífero. Por este motivo, la utilización de sal para el deshielo ha sido restringida en varios países europeos donde se recomienda el uso de materiales inocuos como la arena o la gravilla. En este mismo sentido se buscan nuevos materiales alternativos como las melazas de la industria azucarera, los residuos de los procesos vitivinícolas, las salmueras o los lactosueros con el objetivo de reducir el uso de las disoluciones salinas.

En las zonas de estacionamiento en donde confluyen vehículos se produce además la contaminación por el vertido de aceites e hidrocarburos.



Figura 209. Aparcamientos de emergencia en la Campaña 2010-2011.

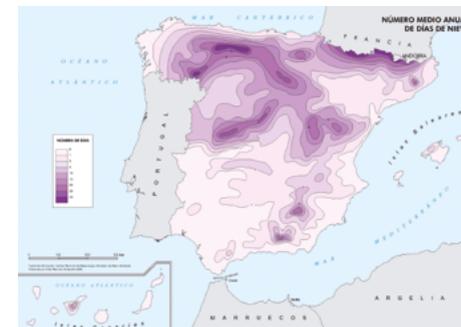


Figura 210. Número medio anual de días de nieve.

7.2. Tipología

A continuación se describen los elementos tipo que configuran las instalaciones de vialidad invernal:

El aparcamiento de emergencia o de vialidad invernal

Es una gran superficie anexa al vial principal que está destinada a acoger a turismos y camiones en condiciones invernales no adecuadas. Se organiza en una zona de circulación interna, una zona de estacionamiento y distintos elementos auxiliares y dispone de una red de evacuación superficial de agua con recogida perimetral y vertido directo al terreno en la mayoría de los casos.

La superficie de circulación debe calcularse para grandes requerimientos de resistencia por estar sometida a maniobras de vehículos de gran tonelaje. Los elementos auxiliares son habitualmente báculos de iluminación y señalización.

El almacén de equipos y de material fundente

Es una instalación donde estacionan los equipos quitanieves para el mantenimiento de los viales y en donde se almacenan los materiales fundentes. Pueden ser edificios, silos o naves de almacenamiento.



Figura 211. Flota de maquinaria quitanieves.



Figura 212. Aparcamiento de vialidad invernal en Medinaceli, Soria.



Figura 213. Almacén de sales fundentes.

7.3. Recomendaciones de diseño

Para el diseño de las instalaciones de vialidad invernal se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

La adecuación a la frecuencia de uso

El aparcamiento de vialidad invernal tiene un uso esporádico, por lo que la elección del acabado superficial debe responder a la capacidad portante y a la resistencia, pero también al mantenimiento del entorno paisajístico y ambiental. Por estos motivos, se recomienda jerarquizar los acabados según la tipología de vehículos y las zonas. La durabilidad y resistencia del firme de

la zona de circulación debe ser mayor que en la zona de estacionamiento, donde se recomienda utilizar acabados permeables.

También debe considerarse la presencia de material fundente e hidrocarburos, por lo que se recomienda la utilización de acabados que favorezcan la amortiguación de la escorrentía y eviten la infiltración de contaminantes al suelo, derivando el agua hacia depósitos o balsas de acumulación y tratamiento.

Algunos acabados pueden ser:

| Acabado para aparcamiento de emergencia | | |
|-----------------------------------------|-------------|------------------------------------------------|
| Continuo | Permeable | Hormigón poroso |
| | | Mezcla bituminosa porosa convencional (b67/70) |
| | | Mezcla bituminosa porosa modificada (BM-3b) |
| | | Agregado superficial triturado o grava |
| Discontinuo | Impermeable | Adoquín de hormigón con junta sellada |
| | | Adoquín cerámico con junta sellada |
| | Permeable | Adoquín de hormigón con junta abierta |
| | | Adoquín cerámico con junta abierta |
| | | Empedrado |

La recuperación de la permeabilidad del terreno

Para evitar los problemas ocasionados por el exceso de impermeabilización se recomienda:

- | Impermeabilizar exclusivamente las superficies necesarias como principal premisa de diseño.
- | Incorporar elementos auxiliares de infiltración que permiten recuperar parte de la permeabilidad previa.

También se recomienda incluir vegetación autóctona en la zona de estacionamiento, una zona de almacenamiento de agua, bandas de biorretención, balsas de evaporación y detención y arbolado para el sombreado. La incorporación de elementos vegetales mejora el confort y contribuye al tratamiento del agua.



Figura 214. Aparcamiento de vialidad invernal en el Molar (N-I), Madrid.

El control, la retención y el tratamiento de agua contaminada

La escorrentía de estas grandes superficies produce la concentración de importantes volúmenes de agua contaminada. Su control se conseguirá mediante la combinación de capas de diferente granulometría, separadores de grasas, procesos de fitodepuración, bandas vegetales e interposición de geotextiles en el firme.

Los materiales fundentes alternativos

Se recomienda racionalizar o sustituir el uso de la sal por otros materiales como la arena o la grava. En todo caso, una vez utilizada es conveniente disponer medios para controlar posibles concentraciones excesivas antes de que alcancen el acuífero, prestando especial atención al diseño de las zonas de almacenamiento y garantizando su estanqueidad.

La adaptación a la climatología

Salvo en periodos de nevada, el aparcamiento de emergencia debe considerar las características climatológicas del lugar en que se implanta conforme a los escenarios climatológicos A, B o C explicados en el capítulo "Aparcamientos".

| Estrategia según el nivel de contaminación | |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Estrategia | Nivel de contaminación |
| Firme con separador geotextil, acabado poroso y biorremediación por vegetación. | Bajo-medio (ocupación puntual y en periodos muy concretos) |
| Separadores de hidrocarburos integrados en la red de evacuación de agua. | Medio-alto (ocupación variable y en periodos largos de condiciones invernales) |
| Separador de hidrocarburos y fitodepuración con especies vegetales específicas. | Medio-alto (ocupación variable y en periodos muy largos de condiciones invernales) |
| Depósitos de retención en infiltración post-tratamiento. | Medio-alto (arrastre de contaminantes) |
| Balsas de retención y evaporación para la decantación de material fundente. | Medio-alto (conforme cantidad de material fundente empleado) |

| Acabado en zona de estacionamiento | | | |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Zona A | Zona B | Zona C |
| Terreno impermeable | Mejora de la permeabilidad del terreno y evacuación a la zona de almacenamiento, tratamiento e infiltración. | | Mejora de la permeabilidad del terreno y evacuación superficial a depósitos o zonas de acumulación, tratamiento e infiltración. |
| | Acabado superficial que evite la acumulación uniforme de nieve y favorezca su retirada. | | |
| Terreno permeable | Infiltración al terreno con interposición de capas de filtrado para mejorar la capacidad de absorción del terreno. | Mejora de absorción del terreno con interposición de capas de filtrado, tratamiento y acumulación en zonas perimetrales y superficiales. | Mejora de absorción del terreno con interposición de capas de filtrado, control de la evacuación superficial, retención, acumulación en zonas auxiliares y tratamiento. |
| | Acabado superficial que evite la acumulación uniforme de nieve y favorezca su retirada. | | |

La renaturalización y la recuperación de paisaje

El aparcamiento de emergencia, implantado en zona no urbanizada debe respetar la preexistencia paisajística y potenciarla. Se trata de un aparcamiento muy particular sin los condicionantes urbanos de implantación o funcionamiento.

Además de todo lo anterior también deben considerarse las variaciones climáticas previstas.



Figura 215. Integración en paisaje: aparcamiento invernal en Halistadt. Austria.

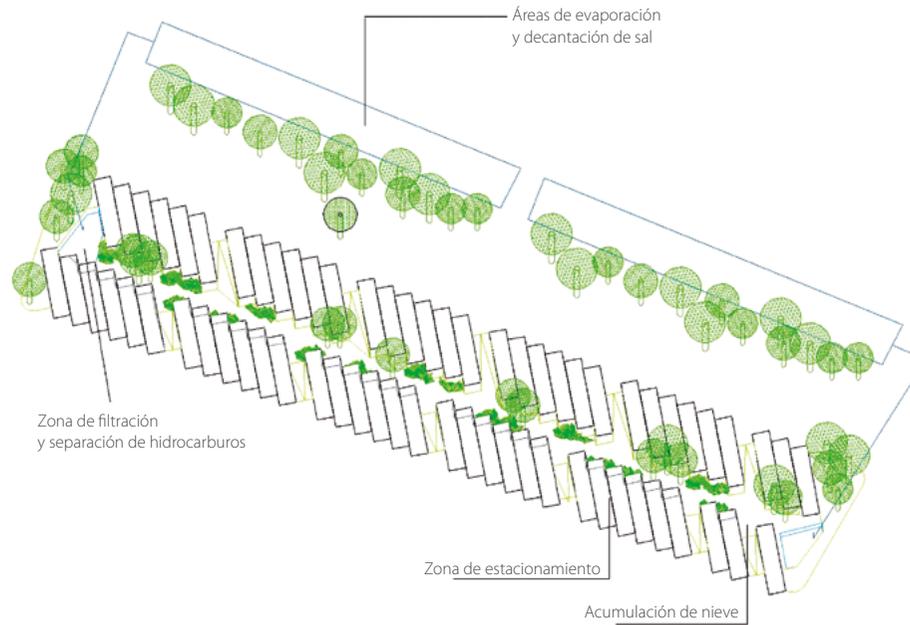


Figura 216. Esquema de aparcamiento de vialidad invernal.

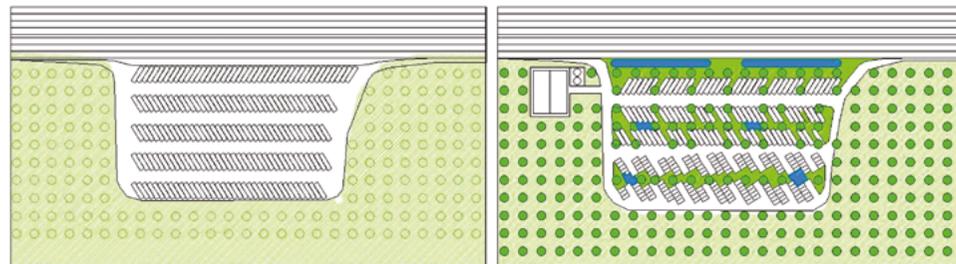


Figura 217. Esquema comparativo antes y después de la renaturalización del aparcamiento de emergencia.

7.4. Ejemplo representativo

Se propone un esquema de diseño de aparcamiento de vialidad invernal incorporando las medidas descritas de jerarquización de pavimentos según zonas, la vegetación, la depuración vegetal del agua, los depósitos de almacenamiento y las zonas verdes en el estacionamiento.

En este tipo de aparcamiento el agua de lluvia captada debe recibir tratamiento de depuración mediante vegetación específica y arquetas separadoras para eliminar su contenido en sal y otros contaminantes. Esta agua es recogida y almacenada en balsas permeables que permiten su evaporación e infiltración. El arbolado se dispone entre las zonas de aparcamiento para dar sombra y continuidad al paisaje.

El diseño de aparcamiento recomendado incorpora los siguientes elementos:

- | Edificio de almacenamiento de maquinaria y sal con recogida de agua pluvial (01).
- | Silos de almacenamiento de material fundente con recogida de agua pluvial (02).
- | Bandas vegetales y balsas vegetadas de detención, evaporación e infiltración (03).
- | Separador de grasas (04).
- | Bandas vegetales y balsa de detención con separador de grasas (05).
- | Viales de circulación interna con pendiente del 2 % hacia los laterales (06).
- | Plazas de estacionamiento de vehículos pesados (07).
- | Plazas de estacionamiento de vehículos ligeros (08).
- | Vial interno de acceso (09).
- | Arqueta separadora de grasas y registro zona edificada (10).
- | Red transporte de agua a balsas (11).



Figura 218. Esquema de aparcamiento de vialidad invernal.

8. Contención de terrenos

Cualquier superficie que presente inclinación puede considerarse como talud y debe diseñarse convenientemente para evitar problemas como la pérdida de estabilidad, la erosión o el exceso de escorrentía, relacionados todos ellos con el tratamiento que se haga del agua de lluvia.

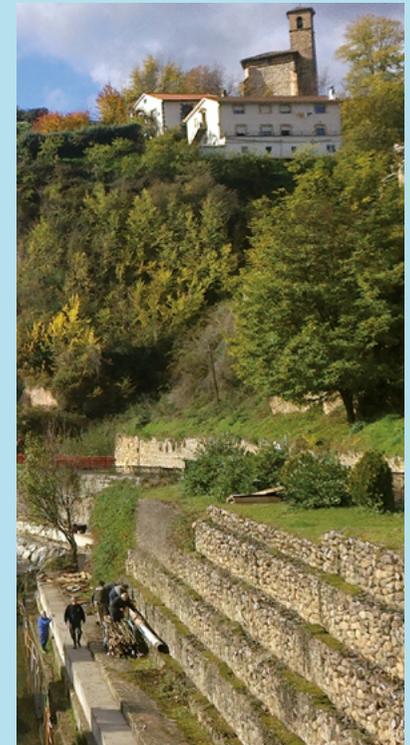


Figura 219. Contención de terrenos.

8.1. Justificación

La adecuada gestión del agua en los sistemas de contención de terrenos está directamente vinculada a la estabilidad, afecta a su erosión y previene de los riesgos asociados a la acción de la escorrentía y el desplazamiento en las áreas colindantes.

A continuación se exponen los principales problemas asociados a la falta de una correcta gestión del agua en los sistemas de contención.



Figura 220. Problemática en contención de terrenos.

La desestabilización del terreno

La influencia del agua en la estabilización del terreno se manifiesta en el incremento de presiones hidrostáticas en el interior del terreno, por la influencia del volumen de agua infiltrada, y el efecto de la escorrentía sobre la superficie del talud.

La acción del agua en las capas interiores del talud provoca la pérdida de cohesión y el aumento de la presión interna por el incremento de volumen de agua contenido en el terreno. Esta alteración determina la variación del ángulo de rozamiento interno y la falta de estabilidad, lo que conlleva un aumento del riesgo de desprendimientos y desplazamientos del terreno.

El efecto de la escorrentía incontrolada sobre la superficie del talud se manifiesta en el aumento del volumen y la velocidad del agua que discurre por el terreno, con riesgo de desplazamientos y arrastre de elementos de gran porte, que contribuye a la pérdida de estabilidad del sistema.

La erosión superficial

El efecto de la escorrentía sobre la superficie del talud provoca la pérdida de las capas superficiales del terreno, responsables de la protección de las capas internas frente a la infiltración excesiva del agua y la erosión frente a agentes atmosféricos externos, como el viento. Por ello, la pérdida de estas capas superficiales de terreno aumenta el riesgo de su deterioro y la pérdida de estabilidad.

La desnaturalización

Tanto los procesos de erosión sobre el cuerpo del talud por escorrentía descontrolada, como la ausencia de humedad en los terrenos contenidos, favorecen especialmente los procesos de disminución progresiva de la cobertura vegetal, incrementando el peligro de desertificación.

Además de la importancia de la vegetación en la retención de la humedad y la cohesión de los materiales que conforman el terreno, su existencia favorece la regulación higrotérmica de las áreas donde se ubica, por lo que la desnaturalización tiene importantes efectos de pérdida de confort en los terrenos en los que se produce.

Las inundaciones asociadas

La ausencia de medidas de control de la escorrentía está directamente relacionada con el aumento del volumen y velocidad del agua que discurre sobre la superficie del talud, con el consiguiente arrastre de los elementos que se encuentra a su paso y el colapso frecuente de los sistemas de evacuación de agua.

Además, la pérdida de la capa superficial del talud disminuye su capacidad de infiltración y de amortiguación de la escorrentía, incrementando las posibilidades de inundación de las áreas cercanas.

8.2. Tipología

Cualquier superficie que se presente con una cierta inclinación respecto a la horizontal es considerada como un talud, natural o artificial, y debe ser estudiada con detenimiento para evitar los problemas asociados a su pérdida de estabilidad, la erosión y el control de la escorrentía.

Entre los principales parámetros que caracterizan la tipología del talud destacan: la pendiente (directamente relacionada con la cohesión y el ángulo de rozamiento interno) y las características de las capas que lo forman. Estos parámetros condicionarán tanto su estabilidad, como su grado de erosión frente a los agentes atmosféricos y junto con los condicionantes climáticos –especialmente la pluviometría– determinan la estrategia de diseño.

Su tipología es función del peso específico, el ángulo de rozamiento interno y la cohesión, y se establece en cuatro categorías: sin cohesión, coherente, deficiente y rocoso.

La presencia de agua en los suelos modifica considerablemente su comportamiento y consistencia.

La cohesión del terreno condiciona directamente la pendiente natural del talud y la aplicación de los elementos de contención o estabilización necesarios.

| Tipo de terreno | Material | Peso específico (T/m ³) | Ángulo de rozamiento interno | Cohesión (T/m ²) |
|-----------------|--------------------------|-------------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Sin cohesión | Bloques y bolos sueltos | 1,70 | 34-40° | — |
| | Grava | 1,70 | 37,5° | — |
| | Grava arenosa | 1,90 | 35° | — |
| | Arena compacta | 1,90 | 32,5-35° | — |
| | Arena semicompacta | 1,80 | 30-32,5° | — |
| | Arena suelta | 1,70 | 27,5-30° | — |
| Coherentes | Limo firme | 2,00 | 27,5° | 1-5 |
| | Limo | 1,90 | 25° | 1-5 |
| | Limo blando | 1,80 | 22,5° | 1-2,5 |
| | Marga arenosa rígida | 2,20 | 30° | 20-70 |
| | Arcilla arenosa firme | 1,90 | 25° | 20-20 |
| | Arcilla media | 1,80 | 20° | 5-10 |
| | Arcilla blanda | 1,70 | 17,5° | 2-5 |
| | Fango blando arcilloso | 1,40 | 15° | 1-2 |
| Deficientes | Suelos orgánicos (turba) | 1,10 | 10-15° | — |
| Rocosos | Rocas | 2,50 | 90° | 25-300 |

Tipología de talud en función de la pendiente del terreno

Inicialmente se han planteado dos tipologías básicas de terreno inclinado en relación con su grado de estabilidad y con las características propias del terreno. De este modo, se diferenciará entre aquellos terrenos inclinados

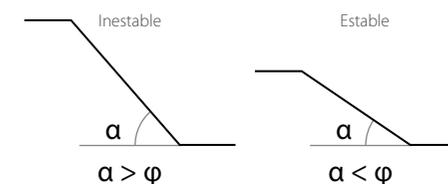
| | |
|---------------------------|-------------------------|
| Sin cohesión o deficiente | 0 T/m ² |
| Coherente | 1-70 T/m ² |
| Rocoso | 25-300 T/m ² |

con una pendiente superior al ángulo de rozamiento interno y aquellos con una pendiente inferior. Los primeros presentan un mayor grado de inestabilidad y, por tanto, los elementos de contención tendrán mayor impacto que en aquellos terrenos más cohesivos.

| Pendiente | Sin cohesión y deficiente | Coherente | Rocoso |
|--------------------------------|---------------------------|----------------|--------|
| > Ángulo de rozamiento interno | Grava, arena y orgánico | Limo y arcilla | Roca |
| < Ángulo de rozamiento interno | Grava, arena y orgánicos | Limo y arcilla | Roca |

Se entiende como pendiente la inclinación máxima de una porción de terreno granular hasta donde es posible su estabilidad sin que se produzcan deslizamientos.

La pendiente del terreno está directamente relacionada con su ángulo de rozamiento interno, de modo que un talud natural tiende a presentar inclinaciones menores a dicho ángulo. Estos valores, a su vez, están vinculados al nivel de cohesión de los materiales que conforman el terreno en cuestión.



α = ángulo de la superficie del terreno con la horizontal
 φ = ángulo de rozamiento interno del terreno

Pendiente inferior al ángulo de rozamiento interno del terreno

En el caso en el que la pendiente del terreno es inferior a su ángulo de rozamiento interno, se puede considerar que, en las condiciones de medición, el talud es estable. Sin embargo, es necesario estudiar en mayor profundidad cada caso concreto y especialmente los usos a los que se verá sometido el talud. Se deben incorporar medidas de mejora de la estabilización frente a los agentes externos que puedan modificar su cohesión.

El agua es el principal agente responsable de la modificación del nivel de cohesión del terreno. La acción de la escorrentía, la infiltración de agua descontrolada y el aumento de la humedad en el terreno alteran su estado y varían significativamente su ángulo de rozamiento interno. Por lo tanto, aunque en principio el talud presente pendientes que aparentemente puedan no presentar ningún peligro, es necesario estudiar en mayor profundidad aquellos mecanismos que per-

mitan mejorar su estabilización en caso de alteración de los condicionantes iniciales del terreno.

Además de la mejora de la estabilización por medios directos, el control de la erosión y la adecuada gestión del agua influyen en el mantenimiento de las condiciones iniciales del terreno y en su estabilidad.

Pendiente superior al ángulo de rozamiento interno del terreno

En el caso en el que la pendiente del terreno es superior a su ángulo de rozamiento interno, la inestabilidad del talud es mayor. El talud tiende a alcanzar su posición de equilibrio produciéndose desprendimientos, corrimientos del terreno, movimientos parciales y asentamientos. Estos aspectos deben tenerse en cuenta a la hora de definir el nivel de peligrosidad y el área que lo rodea. Para controlar estos procesos es necesario recurrir a estrategias de estabilización, que se exponen en el apartado siguiente.

Al igual que en el terreno con ángulo de rozamiento interno superior a la pendiente, en este caso es significativo el control del agua sobre las diferentes capas del talud.

En esta situación, donde normalmente las inclinaciones son mayores, la capacidad de infiltración del terreno es menor, debido al aumento de la velocidad de escorrentía. Por ello, la incidencia de la erosión en el pie del talud es superior.



8.3. Recomendaciones de diseño

Con el objetivo de establecer una metodología de estudio que permita el desarrollo de diferentes estrategias de actuación y mejora en los sistemas de contención del terreno, se ha diferenciado entre los principales elementos configuradores de un talud tipo, sin perder por ello la visión de conjunto de las aplicaciones a realizar.

Un talud tipo se organiza en tres elementos configuradores: cabeza, cuerpo y pie de talud. Cada uno de ellos tiene características específicas que determinan las actuaciones a aplicar en cada caso.

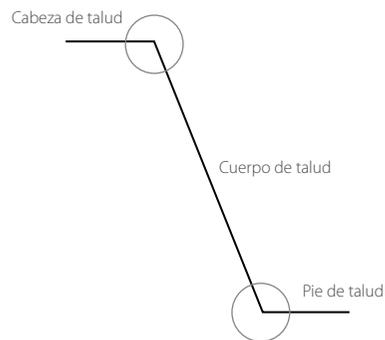


Figura 221. Elementos configuradores del talud tipo.

La cabeza del talud. Es el área de encuentro entre la superficie plana de la cota superior y el comienzo de la superficie inclinada que forma la pendiente.

El cuerpo del talud. Es la superficie inclinada que conecta la zona de cota inferior y superior. Presenta pendiente diferente en función de la altura a salvar y de las propiedades de los materiales constituyentes.

El pie del talud. Es el área de encuentro entre la superficie inclinada y la superficie de la base.

Para determinar el diseño, se debe tener en cuenta el funcionamiento del conjunto, puesto que el comportamiento de cada elemento influye en el resto. Las medidas que se adoptan en la cota superior afectan a los elementos en la cota inferior.

Las estrategias de diseño a considerar se exponen a continuación.

LA ESTRATEGIA DE ESTABILIZACIÓN DEL TALUD

Es necesaria para mantener la cohesión interna del terreno y evitar el desplazamiento y la alteración de la pendiente que afecta a la seguridad de las áreas de cabeza y a las cercanas al pie del talud.

La mejora de la estabilización del talud se puede afrontar mediante la modificación de la pendiente o mediante la mejora de la cohesión del terreno.

Los sistemas basados en la modificación de la pendiente se aplican principalmente en terrenos en los que el ángulo de rozamiento interno es inferior a la pendiente deseada, por lo que es necesario recurrir a mecanismos que eliminen esta problemática. Estos sistemas se organizan en función del grado de alteración de la pendiente que se va a realizar, diferenciando entre: elementos de contención vertical, elementos de escalonamiento del terreno y modificación de la pendiente por abatimiento del terreno.

Por otro lado, los sistemas de mejora del terreno se fundamentan en la aplicación de estrategias que permitan mantener la pendiente deseada. Para ello se ha diferenciado entre sistemas puntuales y sistemas continuos de estabilización del terreno.

Modificación de la pendiente

Elementos de contención vertical

Los elementos de contención vertical se aplican principalmente en dos situaciones: proyectos en los que es necesaria la utilización de

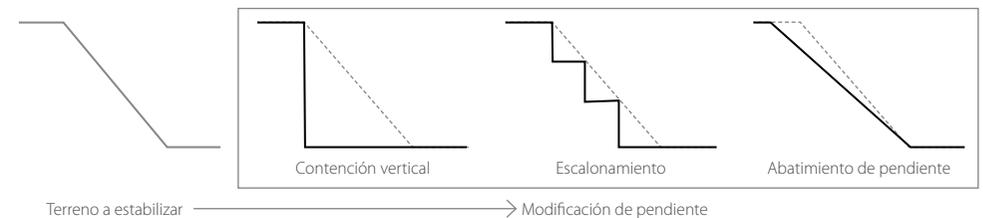


Figura 222. Esquema de modificación de la pendiente.

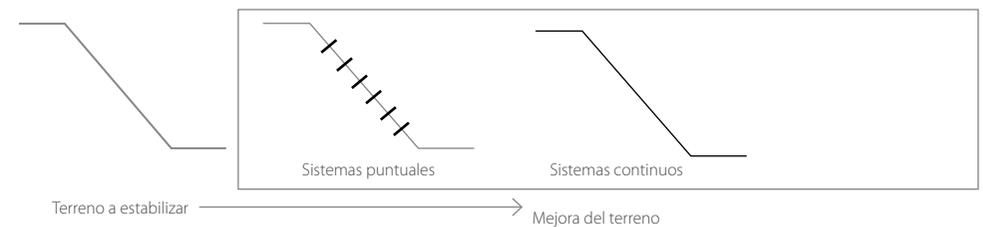


Figura 223. Esquema de mejoras del terreno.

superficies planas lo más amplias posibles y en terrenos con una baja cohesión y ángulo de rozamiento interno, como los terrenos orgánicos o granulares, en los que la pendiente de estabilización posible es muy baja. Se diferencian entre aquellos elementos en los que la contención vertical es completa y aquellos en las que se mantiene una superficie de talud inclinada en combinación con un sistema vertical de contención.

En todos ellos se debe estudiar la capacidad de infiltración del terreno y plantear la evacuación y conducción del agua necesaria para que la humedad y las presiones internas no lo puedan desestabilizar.

La contención vertical del terreno puede conseguirse mediante los siguientes elementos:

El muro de hormigón. Es un sistema lineal continuo realizado en obra con drenaje en su cara interior y conducción del agua en la cara exterior del pie del muro. Se recomienda que el trasdós incluya un sistema de drenaje adecuado del terreno.

La escollera. Es un bloque pétreo de voladura (300 a 3.000 kg) con forma prismática y superficie rugosa. Puede ser vertida, compactada o colocada. La escollera vertida se emplea como manto drenante o cimiento de terraplenes sobre suelo blando, la escollera compactada se emplea como contención del terreno y la escollera colocada, que se utiliza mayoritariamente en taludes.

Todas ellas permiten el drenaje a través de los intersticios, se adaptan fácilmente a movimientos diferenciales y se integran en en-

tornos naturales. Deben ser colocadas con maquinaria especial.

El gavión metálico. Caja metálica rectangular rellena de cantos rodados, piedra de cantera o material mampuesto apilado para la construcción del muro. Este elemento permite aumentar la rapidez de puesta en obra y es muy permeable, por lo que se facilita el crecimiento de vegetación. Puede ser rígido o flexible.

El gavión rígido puede construirse con malla de triple torsión o electrosoldada e inoxidable (recomendada cuando existen requerimientos de planeidad). La malla electrosoldada no es válida para estructuras de contención de más de 1,5 m de altura).

El gavión flexible es predominantemente bidimensional y se utiliza para el control de la erosión y la mejora de la capacidad filtrante del terreno. Se recomienda su uso para la estabilización y la protección del lecho y los márgenes de los cursos fluviales, la protección de los canales, la protección de las base de los taludes, la protección de los drenajes de la carretera y como separador o filtro de elementos en suspensión o sólidos en sistemas de depuración.

El gavión con vegetación. Las características constructivas del gavión le confieren gran permeabilidad y capacidad de infiltración

del agua al terreno. Por ello, su aplicación conjunta con plantas autóctonas permite aumentar las ventajas del control higrótico de estos elementos.

Para la mejora de las condiciones dentro del propio gavión se colocan bolsas geotextiles con el terreno orgánico para evitar la disgregación del material entre los cantos. La cobertura vegetal de gran porte se consigue utilizando ramas vivas introducidas en el terreno y contenidas entre los bloques de gavión.

El gavión flexible permite su combinación con vegetación. Su menor espesor permite que las raíces de las plantaciones alcancen más fácilmente el terreno.



Figura 224. Comparativa de los sistemas de contención vertical completa y combinada del terreno.



Figura 225. Sistemas de contención vertical.

| **La tierra armada.** Refuerzo del terreno mediante armado con bandas metálicas de inmovilización en el que la cara exterior del muro está recubierta con placas vistas de hormigón ancladas al terreno mediante las propias bandas. Las armaduras especiales están formadas por bandas metálicas galvanizadas de 45 y 50 mm de ancho, diseñadas para aumentar las tensiones tangenciales producidas entre el terreno y la armadura.

| **El prefabricado discontinuo.** Esta alternativa al muro de hormigón fabricado in situ disminuye el tiempo de ejecución y la necesidad de encofrados en obra. Permite el drenaje en el trasdós del muro y si incluyen cavidades para tierra posibilita el crecimiento de la vegetación. La utilización de elementos prefabricados de pequeñas dimensiones favorece el drenaje interior del terreno y disminuye las presiones hidrostáticas.

| **Los sacos al tresbolillo.** Sacos de polipropileno unidos por conectores del mismo material y rellenos de terreno orgánico. El sistema está basado en los principios de tierra estabilizada mecánicamente (TEM). Su bajo coste y simplicidad constructiva permite su utilización en lugares de difícil acceso. No necesita cimentación, permite la hidrosiembra y es permeable.

Elementos de escalonamiento del terreno
El escalonamiento del terreno consiste en la alteración de la pendiente natural del talud mediante bancales para aumentar su estabi-

lización frente a los desplazamientos. Puede tener otros objetivos, como la plantación con fines agrícolas o paisajísticos, el diseño de caminos o zonas estanciales intermedias.

Respecto a la gestión del agua, el escalonamiento favorece el control de las aguas superficiales y el control de la erosión por la escorrentía, ya que aumenta la superficie de contacto respecto al plano continuo inclinado, permite el aprovechamiento del agua y su acumulación para el crecimiento de la vegetación. Para una correcta gestión del agua, se disponen cunetas en la zona inferior, media y superior, que permiten una buena evacuación de la escorrentía con lluvias constantes y de gran volumen de precipitación.

Los elementos constructivos empleados para la formación de los bancales y su estabilización pueden ser los mismos que se han descrito anteriormente (gavión, murete de contención de hormigón, bloque armado, bloque prefabricado, etc.).

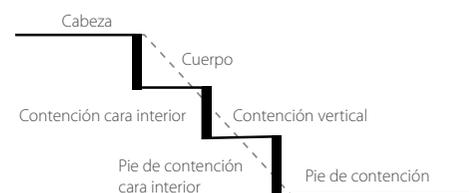
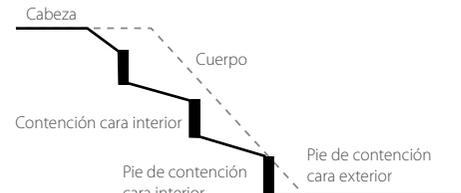


Figura 226. Comparativa de los sistemas de escalonamiento perpendicular y en combinación con talud.

Los sistemas de aterrazamiento pueden realizarse de modo que la superficie de contención vertical contenga a todo el talud (escalonamiento perpendicular) o manteniendo cierta superficie inclinada en combinación con el elemento de contención (escalonamiento en combinación con el talud).

Entre los sistemas específicos destaca la construcción del bancal estabilizado por estacas o empalizadas. En este sistema constructivo tradicional los elementos verticales de contención están formados por estacas de madera, mientras que los horizontales por cañas o bambú; formando un entramado que estabiliza el terreno y aporta resistencia frente a los desplazamientos.

Además, se recomienda recubrir las áreas planas con suelo orgánico para favorecer el crecimiento de la vegetación, aumentar la cohesión del terreno y mejorar su comportamiento higrótérmico.



Modificación de la pendiente por abatimiento del terreno

La estrategia de abatimiento de la pendiente consiste en reducir la inclinación del talud respecto a su topografía de origen para equilibrarlo con el ángulo de rozamiento interno del terreno.

| **El abatimiento en cabeza.** En función de las dimensiones del talud, se puede reducir únicamente la pendiente en el área de cabeza. Es recomendable que en terrenos inclinados de gran altura se reduzca el peso en cabeza a través de la eliminación parcial del terreno; disminuyendo la problemática de los desplazamientos.

| **El abatimiento en la superficie del talud.** En aquellos terrenos de menor altura y en los que el volumen de terreno a retirar no es



Figura 227. Esquema de abatimiento de la pendiente en la cabeza y el abatimiento de la cabeza.

tan elevado, se puede plantear la reducción homogénea de la pendiente constante a lo largo de toda su superficie.

Mejora de la cohesión del terreno

La mejora de la cohesión del terreno es otra forma de estabilización. Para ello se puede recurrir tanto a sistemas puntuales de anclaje, como a la incorporación de diferentes materiales que mejoren su estabilidad.

Sistema puntual de estabilización del terreno

El sistema puntual se fundamenta en la incorporación de elementos de anclaje, perpendiculares al terreno, de modo que mejoran su cohesión y la estabilización global de la pendiente.

| **La estaca o empalizada.** Entramado de estacas de madera en vertical y estacas de cañas o bambú en horizontal que estabiliza el terreno y aporta resistencia frente a los desplazamientos. La superficie horizontal se recubre con suelo orgánico para favorecer el crecimiento de la vegetación.

| **El estaquillado de revestimiento poroso de piedra.** Estaquillas de matorral ancladas firmemente en el terreno entre los huecos que dejan las rocas previamente extendidas. Forman un ángulo de noventa grados con la superficie del talud y sobresalen ligeramente sobre el revestimiento. Conviene una distribución aleatoria y con una densidad de 2 a 5 estaquillas por metro cuadrado.

| **El anclaje.** Elemento longitudinal metálico y tensionado que se introduce en el terreno para mejorar rápidamente su estabilidad del terreno. Es de fácil aplicación y no requiere de grandes movimientos de tierra.

Sistema continuo de estabilización del terreno

El sistema continuo de estabilización del terreno mejora la estructura del suelo y aumenta su capacidad de retención de agua, contribuyendo a la disminución del volumen y la velocidad de la escorrentía. Según el material utilizado se definen dos grupos:

| **El estabilizante orgánico.** Sustancias naturales que mejoran la estructura del terreno y retienen mayor porcentaje de humedad, como la harina de semilla y el extracto natural de alga. Estas sustancias protegen la semilla mientras germina y crece la vegetación, reduciendo el impacto de la lluvia y el viento, incrementando la infiltración del agua, reduciendo el volumen de la escorrentía y manteniendo la humedad.

| **El estabilizante sintético.** Polímeros líquidos combinados con sustancias auxiliares (humidificadores y secadores por toma acelerada de oxígeno). Son solubles y se adaptan a todo tipo de irrigación, contribuyen a cohesionar las partículas finas superficiales, controlan la erosión, mejoran la porosidad del terreno y disminuyen los daños por irrigación. También protegen la cobertura en la

superficie de los suelos degradados y favorecen la germinación de las semillas. Se aplica mediante proyección y puede combinarse con hidrosiembra, incluso en terrenos de gran pendiente.

| **El hormigón.** Disminuye considerablemente la permeabilidad de la capa superficial del terreno, incrementando la velocidad y el volumen de la escorrentía. Se aplican mediante mantas de hormigón o gunitado. No se recomienda.

LA ESTRATEGIA DE CONTROL DE LA EROSIÓN SUPERFICIAL

Los sistemas de control frente a la erosión se centran en estrategias que mejoran el comportamiento de la superficie del talud frente a los agentes adversos, como la escorrentía, el viento o la nieve. Se ha diferenciado entre los sistemas de mejora del terreno mediante la utilización de capas intercaladas y los sistemas que incorporan cobertura vegetal, siendo recomendable la utilización combinada de ambos.

Mejora con capas superficiales

Esta estrategia consiste en la utilización de capas orgánicas o inorgánicas que mejoran el comportamiento del talud frente a la escorrentía.

| **La malla o red.** Orgánica (fibras vegetales) o sintética (HDPE-polietileno alta densidad), bidimensional o tridimensional, controlan la erosión laminar, mejoran la cobertura favoreciendo el crecimiento de la vegetación. Pueden incorporar entre sus huecos grava o tierra vegetal, césped natural precultivado o semillas. Son especialmente indicadas para zonas de erosión elevada o con condiciones desfavorables para el crecimiento de la vegetación.

| **La geocelda.** Consiste en una estructura plástica de polietileno formada por bandas de 1 mm de espesor y conectadas entre sí mediante procesos de ligado por extrusión o adhesión. Suele estar rellena con material granular o con terreno de mayor cohesión, permitiendo su confinamiento y el control frente a la erosión por escorrentía, viento y nieve.

| Método | Ventajas | Desventajas |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Mejora capas superficiales | Mejora de drenaje superficial y control de erosión. | Escasa influencia directa sobre estabilidad. |
| Cobertura vegetal | Mejora de la estabilidad del terreno y retención del agua. Mejora del confort higrotérmico. | Mantenimiento y riego. |
| Combinación | Suma de ambas. | Coste superior. |

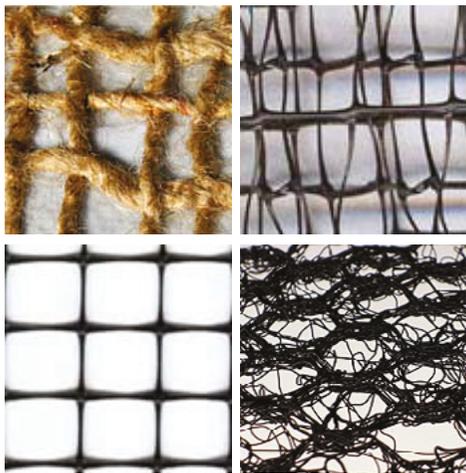


Figura 228. Mallas para la mejora superficial.

Mejora de la cobertura vegetal

La incorporación de cobertura vegetal a la superficie del talud contribuye a la mejora de sus propiedades resistentes, al control de la erosión y al amortiguamiento del efecto del agua de lluvia, disminuyendo la escorrentía. La vegetación mejora los niveles de confort higrotérmico en las áreas en las que se ubica y disminuye el nivel de desertificación de la zona. Las opciones para la mejora de la cobertura vegetal son múltiples:

| **Las plantas tapizantes.** Vivaces o perennes (gazania, *Dichondra repens* y santolina), plantas crasas (*Sedum*), arbustos (cotoneaster y romero rastrero) y trepadoras (hiedra y madrelelva).

| **La manta orgánica.** Rollos de relleno vegetal encerrado entre dos capas de malla orgánica tejida de fibras vegetales (esparto, coco y yute). Es especialmente recomendada para lugares con regueros de erosión moderada o erosión laminar alta y en taludes con pendientes considerables de entre 1:1 y 2:1 y de hasta 40 metros de altura. Su coste es relativamente bajo y su aplicación rápida y sencilla.

| **La parrilla metálica.** Geomalla y mallazo metálico de sujeción que actúa como encofrado perdido y contención de finos y no tiene función estructural sobre el talud. Se puede utilizar en inclinaciones de hasta 80°.



Figura 229. Geoceldas, parrillas, mallas y mantas orgánicas para la mejora superficial.

| **Las especies herbáceas.** Capas vegetales uniformes con raíces de 10 a 50 cm de profundidad. La resistencia es mayor si se complementan con plantas de bajo porte.

| **La siembra a voleo.** Siembra manual o mecánica sobre el terreno previamente rastrillado para evitar el riesgo de arrastre.

| **La hidrosiembra.** Manto vegetal rápido y de fácil aplicación mediante una mezcla de estabilizadores y semillas. La mezcla se proyecta sobre el terreno con un cañón hidráulico o hidrosebradora.

| **El mulch o acolchado.** Cobertura del terreno mediante materiales sintéticos (caucho, roca,

grava) u orgánicos (compost, restos de siega, poda, etc.), que permite disminuir la evaporación, manteniendo la humedad necesaria para las raíces de las plantas.

| **El hidromulch.** Fibras vegetales con estabilizante y aditivos y proyectados sobre el terreno para formar una capa fibrosa que mantenga las semillas en contacto con el suelo. Es más efectivo que el mulch convencional.

| **El tepe.** Rollo con sustrato vegetal precultivado que reduce el tiempo de puesta en obra. Se aplica extendiendo los rollos sobre el terreno y es recomendable el uso de anclaje auxiliar en taludes con fuertes pendientes.



Figura 230. Vegetación, tapizantes, hidrosiembra y mulch.

| **La cobertura vegetal autóctona de bajo porte.** La plantación vegetal de bajo porte, presenta una profundidad de enraizamiento mayor que la herbácea (de entre 0,5 y 1,5 m) y una persistencia más duradera. Sin embargo, su proceso de crecimiento es más lento, por lo que se pueden utilizar en combinación con sistemas herbáceos durante los primeros años. Antes de la siembra se debe mullir el terreno para conseguir una buena retención del agua. Para ello, los suelos pobres o escasos se combinarán con otros de préstamo. La plantación podrá realizarse mediante siembra, cepellones o estacas y ramas vivas.

| **El paquete de matorral.** Técnica de control de la erosión basada en la utilización de paquetes de matorral y tierra compactada como relleno en depresiones originadas por pequeños deslizamientos. Las ramas actúan como tirantes de refuerzo del suelo.

| **La estera de matorral.** Consiste en cubrir la superficie del cuerpo del talud con gruesas capas de ramas atadas y entrelazadas, formando colchones extendidos o anclados mediante estacas. Para su aplicación se realiza una zanja de hasta 30 cm de profundidad, situando las ramas en su interior con el extremo inferior orientado hacia la cara del talud.

| **El enramado.** Cerco de estacas de pequeñas dimensiones (de 6 a 15 cm de diámetro y de 0,7 a 1,5 m de longitud) hincadas a distancias máximas de medio metro y formando un entretejido con una capa de ramas perpendiculares, de espesores entre 30 y 60 cm, que profundizan 30 cm en el terreno.

| **El entretejido del talud.** Sistema similar al enramado, consistente en la construcción de zanjas lineales poco profundas, en las que se disponen manojos de especies leñosas de fácil enraizamiento. La distancia aproximada entre filas es bastante variable, desde valores cercanos al metro hasta separaciones de 6 m.

| **La cobertura vegetal autóctona de gran porte.** Aumenta la estabilidad y mejora el control de la erosión por amortiguamiento

de los agentes climáticos externos y mediante el control del desprendimiento del terreno. Su eficacia está directamente relacionada con el tipo de terreno y con las especies plantadas.

Para la implantación en el terreno de elementos vegetales de gran porte se recomienda la siembra, el uso de cepellones o estaquillado, fajinas o la combinación de las medidas anteriormente expuestas.

LA ESTRATEGIA DE LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL AGUA

Las estrategias de gestión del agua asociadas a la mejora de los sistemas de contención de terrenos se organizan en tres grupos: el incremento de la permeabilidad de las capas superficiales, la conducción y evacuación del agua a otras áreas y la acumulación del agua. Cada uno de ellos tiene una aplicación específica en función de los elementos configuradores en los que se aplique y de los condicionantes locales del lugar en el que se construya, especialmente atendiendo a la pluviometría y la permeabilidad del terreno.

La pluviometría influye principalmente en el volumen de agua a infiltrar y en función de la periodicidad de las precipitaciones, el consiguiente impacto de cantidad y velocidad de la escorrentía sobre la superficie del talud. Por otro lado, las características del terreno son determinantes para definir la tipología del sistema de contención empleado.

A continuación se exponen las principales actuaciones a realizar en los elementos configuradores de los sistemas de contención del terreno, aunque para cada caso concreto se recomienda realizar un análisis más exhaustivo:

| En la cabeza del talud se buscará disminuir el volumen del agua mediante badenes o contra-inclinaciones del terreno, en combinación con la infiltración y la evacuación del agua excedente.

| En el cuerpo del talud se controlará la erosión por escorrentía, la infiltración en capas superficiales y la evacuación del agua.

| En el pie del talud se prestará atención a la escorrentía desde las superficies superiores y a los materiales arrastrados.

Incremento de permeabilidad de las capas superficiales

La mejora de la permeabilidad de las capas superficiales se puede obtener con las siguientes acciones:

| **El descompactado del terreno.** Reducción de la densidad del suelo para mejorar la capacidad de almacenamiento de agua y la profundidad de enraizamiento de la vegetación.

| Tipo de talud | Descripción | Efecto estabilizador de las raíces |
|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | Capa de suelo de poco espesor, totalmente reforzado por masa rizomática y masa rocosa impenetrable | El efecto estabilizador es bajo, situándose el plano de rotura en contacto con la roca con posibilidad de desplazamiento del conjunto |
|  | Capa de suelo de poco espesor sobre masa rocosa discontinua en la que las raíces se introducen y actúan como puntales de contención junto con el tronco | Gran efecto estabilizador |
|  | Capa de suelo de mediano espesor combinada con capa de transición de mayor densidad y resistencia al corte según la profundidad | Efecto estabilización sustancial |
|  | Capa de suelo de gran espesor en la que los árboles enraizan sin llegar a la capa rocosa base | Inestabilidad en capa profunda (árboles flotando en el suelo) |

ción. En cuanto a la maquinaria a utilizar, se recomienda emplear un ripper, subsolador o arado de vertedera, dependiendo de la profundidad de labor y de la necesidad de volteo y mezcla del sustrato.

| **El gavión de recubrimiento.** Permite el encauzamiento, la protección de márgenes y el revestimiento de lagunas, favoreciendo la infiltración del agua y el control de la erosión.

| **La cobertura vegetal.** Contribuye a la amortiguación del agua de lluvia, presentando diferentes porcentajes de captación de la precipitación total en función de la especie vegetal.

Ralentización, conducción y evacuación del agua

La gestión del agua y el control de la permeabilidad son fundamentales para disminuir el volumen de la escorrentía que fluye por el cuerpo del talud y asegurar la estabilidad interna del terreno. Por ello, para prever los fenómenos de escorrentía, es necesario conocer en profundidad cuál es la cuenca de recepción que afecta al talud y su caudal máximo posible.

Estas estrategias pretenden reducir la presión intersticial que actúa sobre la superficie de deslizamiento. Para ello, pueden diseñarse en superficie o en profundidad, de modo que mientras en el primero la función principal es recoger el agua superficial y evacuarla evitando su infiltración; con la segunda se pretende

deprimir el nivel freático para disminuir la presión intersticial.

Las estrategias se materializan en las siguientes medidas:

| Evitar que el agua superficial se infiltre directamente o por la grieta del terreno para controlar el nivel freático y la presión intersticial. Se recomienda aplicar esta estrategia principalmente en la cabeza y el cuerpo del talud.

| Controlar los efectos erosivos del agua de escorrentía sobre la superficie del talud. Esta estrategia se desarrolla en las tres partes del talud, aunque las áreas donde los efectos son mayores son en el cuerpo y el pie del talud.

A continuación se presentan las principales estrategias de conducción y evacuación del agua a otras áreas que deben tenerse en cuenta en el diseño de un talud, estableciéndose dos categorías: superficiales y subsuperficiales.

| Tipo de vegetación | Intercepción (%) |
|----------------------|------------------|
| Taiga | 10-15 |
| Arbolado caducifolio | 15-25 |
| Arbolado coníferas | 25-35 |
| Bosque tropical | 25-30 |
| Pasto | 25-40 |
| Maíz | 25 |
| Cereal | 20-25 |

Sistemas superficiales

| **La contrapendiente.** Intercepta el agua superficial en cabeza para que no invada el talud.

| **El canal o cuneta de guarda.** Recoge y desvía el agua de la escorrentía hacia otras áreas. La pendiente y la sección transversal se deben calcular para transportar el agua a una velocidad no erosiva. Se recomienda utilizar represas o vegetación para pendientes excesivas.

| **El caz.** Franja estrecha y longitudinal de menor sección y profundidad que el canal, situada al borde de la plataforma de la cabeza del talud, con protecciones superficiales que eviten su colmatación y conectado a una red



Figura 231. Canal de guarda, canal intermedio, drenaje horizontal y subdren de zanja.

de sumideros para permitir la evacuación continua de agua.

| **El canal intermedio.** Situado en el cuerpo del talud para frenar el agua de escorrentía por la ladera. Relleno con material drenante, puede separarse del terreno natural mediante lámina impermeabilizante si la infiltración no es posible.

| **La zanja de trinchera.** Situada en el cuerpo del talud, retiene gran cantidad de agua y disminuye el volumen de la escorrentía. Se recomienda incluir vegetación.

Sistemas subsuperficiales

| **La franja de infiltración.** Área vegetal del terreno, ancha y con poca pendiente, para la recepción e infiltración del agua de escorrentía. Se coloca en la base del talud.

| **El subdren de zanja.** Apertura de zanja al pie del talud con una profundidad mínima de 1,5 m. El fondo se cubre con material filtrante, como grava y arena de un tamaño máximo de 5 cm de diámetro, sobre el que se asienta una tubería drenante perforada de diámetro entre 15 y 20 cm.

| **El drenaje de arcén.** Similar al canal intermedio o a la zanja de trinchera, pero con una lámina de impermeabilización que separa la zanja de los materiales porosos del terreno. No dispone de tubo drenante.

| **La cuneta verde.** Canal con vegetación en forma de “v” y con especies vegetales tapizantes autóctonas. Recoge y conduce el agua de la escorrentía desde la base del talud a las zonas de almacenamiento.

| **El pozo.** Perforación vertical abierta para disminuir el volumen del agua de la escorrentía.

| **La galería o túnel de subdrenaje.** Sistema de gran dimensión en laderas de gran tamaño. Se construye excavando entre las capas freáticas más saturadas, de modo que el agua se filtra hasta la parte impermeable de su base. Permite la captación y distribución del agua.



Figura 232. Franja de infiltración, drenaje de arcén y cunetas verdes.

| **El drenaje horizontal en talud.** Es una tubería porosa utilizada para captar el agua interior y expulsarla para su infiltración, acumulación o evacuación. Normalmente está incrustado en la base del talud.

| **El drenaje horizontal en el trasdós del muro.** Aconsejable para evitar una elevada presión hidrostática sobre el muro. Su colocación es difícil, especialmente en el caso de grandes alturas y debe incluirse en la fase de construcción.

Acumulación del agua de la escorrentía

Los sistemas de acumulación de agua se han definido en mayor profundidad en el apartado correspondiente. Sin embargo, se hace una breve descripción de los principales sistemas asociados a la acumulación de agua de escorrentía recogida en sistemas de acumulación.

| **El subdren horizontal de penetración.** Tubería perforada introducida en el terreno mediante una perforación profunda horizontal o ligeramente inclinada.

| **La laguna de acumulación.** Gran superficie donde el agua de la escorrentía es recibida y permite la acumulación, infiltración e incluso la depuración (vegetal).

| **El estanque de retención.** Pequeña laguna artificial con lámina de agua permanente de entre 1 y 2 m profundidad. Permite laminar el caudal punta.

| **La depresión de infiltración.** Depresión de terreno con vegetación en el que el agua de escorrentía recibida es almacenada y gradualmente infiltrada.

| **El área de detención.** Superficie permeable, superficial o subsuperficial, diseñada para el almacenamiento temporal del agua de escorrentía.

8.4. Estrategias en función de la precipitación, la permeabilidad y el diseño

Conforme a lo estudiado en los apartados anteriores se ha procedido al estudio de los sistemas de contención del terreno y las estrategias aplicables a cada una de ellos, donde se han tenido en cuenta los parámetros asociados a la localización de cada propuesta (volumen de precipitación y nivel de permeabilidad del terreno).

A continuación, se muestra una tabla orientativa en la que se asocian las pendientes aconsejadas por la Asociación Española de Ingeniería del Paisaje (AEIP) para cada una de las técnicas propuestas:

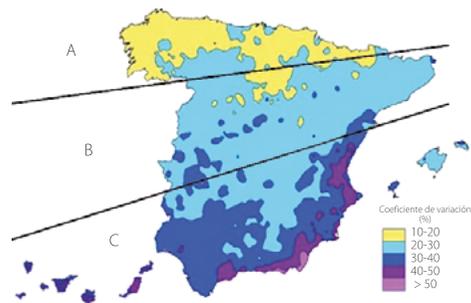


Figura 233. División geográfica según la variación de la precipitación.

| Tipo de talud según pendiente | |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pendiente | Técnica |
| < 35° | Siembra Hidrosiembra |
| 35-45° | Cobertura con mantas orgánicas y siembra / hidrosiembra Matorrales escalonados Matorrales escalonados reforzados |
| 45-60° | Enrejado vivo Empalizada viva Tierras reforzadas |
| 60-80° | Tierras reforzadas Tierras armadas |

Se han determinado las siguientes áreas de intervención de acuerdo con estas matrices de estrategias:

| Cabeza | Zona A | Zonas B y C |
|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Control de la escorrentía y evacuación | | |
| Impermeable | Incremento permeabilidad superficial. Cunetas de guarda y vegetación autóctona. | Contrapendiente en cabeza. Cunetas de guarda y vegetación autóctona. |
| Control de la escorrentía, control de la infiltración y evacuación | | |
| Permeable | Mejora de permeabilidad superficial. Evacuación subsuperficial. Subdren en zanja. Vegetación autóctona. | Mejora de la permeabilidad superficial. Contrapendiente en cabeza. Evacuación subsuperficial. Subdren en zanja, cuneta de guarda y recubrimiento de amortiguación. Vegetación autóctona. |

| Cuerpo | Zona A | Zonas B y C |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Control de la erosión | | |
| Impermeable | Incremento de la permeabilidad superficial. Cobertura vegetal autóctona tapizante y vegetación de mediano o gran porte. Canales intermedios con vegetación en grandes taludes. | |
| Control de la erosión y control de la infiltración superficial | | |
| Permeable | Mejora de la permeabilidad superficial. Cobertura vegetal autóctona tapizante y de mediano o gran porte. Drenaje del exceso de agua acumulada en el interior del talud. Zanja de trinchera con vegetación. | Mejora de la permeabilidad superficial. Mejora de la capa superficial y de la cobertura vegetal autóctona tapizante y de mediano o gran porte. Drenaje del exceso de agua acumulada en el interior del talud. Canales de evacuación superficial o zanjas de trinchera con vegetación. |

| Pie | Zona A | Zona B | Zona C |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Control de erosión y evacuación | | | |
| Impermeable | Protección de capas superficiales. Vegetación autóctona. Drenaje del trasdós. Subdrenes en zanja o drenaje de arcén con vegetación. | Protección de pie mediante capas superficiales y vegetación autóctona. Drenaje del trasdós. Subdrenes en zanja o drenaje de arcén. | Protección de pie mediante capas superficiales o elementos de gran resistencia (gaviones flexibles...). Drenaje del trasdós. Subdrenes en zanja o drenaje de arcén. |
| Control de la erosión, control de la infiltración superficial, conducción y evacuación | | | |
| Permeable | Protección mediante capas superficiales y vegetación autóctona. Drenaje del trasdós. Infiltración al terreno mediante cunetas verdes o franjas de infiltración. | | Protección mediante capas superficiales o elementos de gran resistencia. Drenaje del trasdós. Infiltración mediante cunetas verdes o franjas de infiltración. |

8.5. Ejemplo representativo

Talud en la Zona B y terreno permeable con contención vertical del terreno combinada con una superficie inclinada. La ubicación es favorable para el crecimiento de vegetación autóctona tapizante o de porte mediano. El suelo permeable permite incorporar medidas de drenaje del agua acumulada en el interior del talud, que tiene una altura de 6 metros, 30° en la parte inclinada y 2 m en la contención vertical.

Elementos propuestos:

| El pie del sistema de contención vertical.

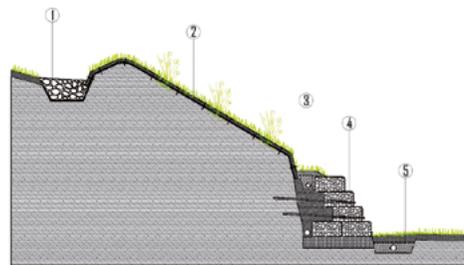
La erosión es controlada mediante gaviones y cunetas verdes o zanjas drenantes o de infiltración. El acabado superficial debe ser con vegetación tapizante.

| La contención vertical.

Realizada con gaviones rígidos de malla de triple torsión apilados hasta una altura de 2 m, de dimensiones 0,50 × 1,00 × 1,50 m y rellenos de cantos de diámetro entre 10 y 20 cm. La construcción del muro se realiza con cuatro hileras escalonadas, apoyando parcialmente el gavión superior en el inferior y en el terreno. La envolvente está formada por malla hexagonal de triple torsión galvanizada, el diámetro del alambre es de 2,7 mm y en sus bordes de 3,4 mm. Los bordes serán enrollados mecánicamente con vueltas de alambres de diá-

metro mayor para aumentar la resistencia de la malla en las esquinas y evitar su rotura.

Los gaviones no necesitan cimentación previa y es suficiente con un compactado del terreno que evita los asientos diferenciales. Para mejorar el comportamiento de contención se puede interponer láminas geotextiles horizontales a cada metro y es recomendable interponer un geotextil entre el área de contacto del muro de gaviones y la superficie del terreno. El sistema de contención vertical debe contar además con drenajes horizontales mediante tubos de diámetro variable, porosos en su zona de contacto con el terreno.



1. Cabeza de talud.
2. Cuerpo de talud.
3. Cabeza de sistema de contención vertical.
4. Sistema de contención vertical.
5. Pie del sistema de contención vertical.

| La cabeza del sistema de contención vertical.

El encuentro de la superficie inclinada del talud con la contención de gaviones debe resolverse mediante una zanja de trinchera con un tubo dren en su interior rellena de material granular filtrante, para favorecer el drenaje del agua y disminuir la velocidad y el volumen del agua de la escorrentía a recibir en la base del sistema de contención.

| La superficie inclinada.

Con pendiente de 30° y altura de 4 m, se resuelve mediante estabilizantes orgánicos que favorecen la protección de la semilla durante la germinación y el crecimiento de la planta, reduciendo el impacto de la lluvia y el viento.

| La cabeza del talud.

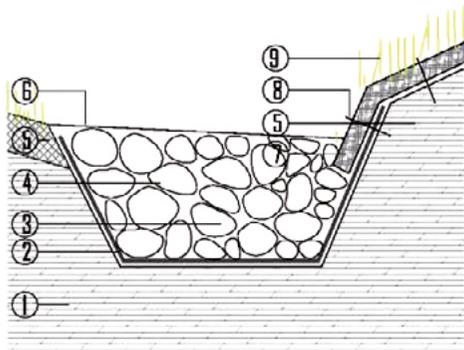
Contrapendiente con subdren en zanja rellena de material granular filtrante con tubo dren perforado en base impermeabilizada. La contrapendiente se debe realizar con terreno natural compactado, una inclinación variable no inferior a 5° y una longitud de 1,5 a 2 m. Se recomienda que el acabado superficial sea en continuidad con el del cuerpo del talud.

| El cuerpo del talud.

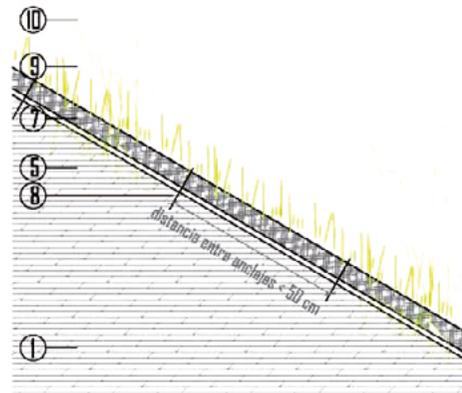
Realizado con mantas orgánicas presemilladas que favorezcan el crecimiento de la vegetación y protejan el terreno. Los laterales de las mantas deben solaparse un mínimo de 5 cm. El solape debe graparse en tramos de 15 cm de longitud distanciados 30 cm. Los anclajes deben ser de barra de acero corrugado de 10 mm de diámetro y 50 cm de longitud total. Se recomienda incluir vegetación de porte mediano.

| El mantenimiento.

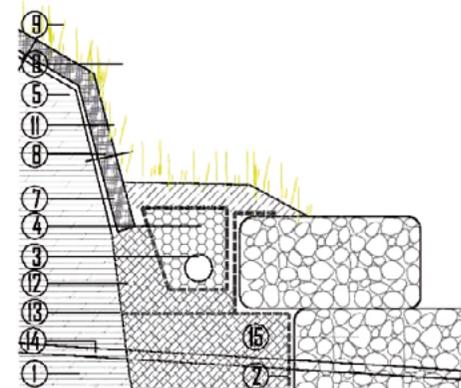
Es necesario realizar tareas de limpieza y el cuidado de la superficie vegetal y tareas de revisión de las posibles colmataciones de los elementos, para revertirlas en caso necesario.



Detalle de cabeza de talud



Detalle de cuerpo de talud



Detalle de cabeza del sistema de contención vertical

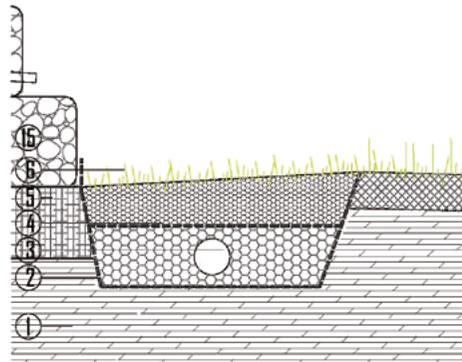
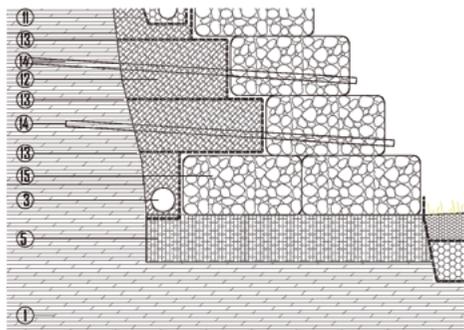


Figura 234. Detalles constructivos en los elementos de contención.

1. Terreno natural.
2. Geotextil.
3. Tubo dren.
4. Relleno de grava.
5. Terreno mejorado.
6. Vegetación autóctona tapizante.
7. Manta orgánica fibra de yute.
8. Anclaje manta orgánica.
9. Hidrosiembra vegetación autóctona.
10. Vegetación autóctona medio porte.
11. Lámina impermeabilizante.
12. Terreno mejorado.
13. Geotextil.
14. Drenaje horizontal.
15. Gavión de malla triple torsón.

Esta es la estimación del coste orientativo para una franja de talud de 1 metro de ancho y por metro cuadrado de cada solución:

| Material | Dimensiones | | | Precio unitario | Total |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------|------|------------------------|------------------------------|
| Cabeza de talud | | | | | |
| Acondicionamiento del terreno | 1,00 | 1,75 | 0,80 | 21,64 €/m ³ | 30,30 € |
| Geotextil | 1,00 | 2,80 | | 1,22 €/m ² | 3,42 € |
| Relleno de la zanja con piedra de 10 a 30 cm | 1,00 | 1,75 | 0,80 | 23,64 €/m ³ | 33,10 € |
| Manta orgánica (fibra de esparto entre mallas de polipropileno) con capa porta semillas | 1,00 | 1,70 | | 1,94 €/ml | 3,30 € |
| Anclaje de manta orgánica al terreno (redondo corrugado diámetro 6 mm y longitud 15-8-15) | 0,38 | 3 ud | | 0,52 €/m | 0,59 € |
| Total | | | | | 70,70 €/m² |
| Cuerpo de talud | | | | | |
| Acondicionamiento del terreno | 1,00 | 6,50 | 0,40 | 21,64 €/m ³ | 56,26 € |
| Mejora del terreno | 1,00 | 6,50 | | 3,05 €/m ² | 19,83 € |
| Manta orgánica (fibra de esparto entre mallas de polipropileno) con capa porta semillas | 1,00 | 6,50 | | 1,94 €/m ² | 12,61 € |
| Anclaje de manta orgánica al terreno (redondo corrugado de diámetro 6 mm y longitud 15-8-15) | 0,38 | 1,50 | 6,50 | 0,52 €/ml | 1,93 € |
| Total | | | | | 90,63 €/m² |

| Material | Dimensiones | | | Precio unitario | Total |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------|------|------------------------|-------------------------------|
| Sistemas de contención vertical | | | | | |
| Acondicionamiento del terreno | 1,00 | 0,45 | 0,90 | 21,64 €/m ³ | 8,76 € |
| Geotextil | 1,00 | 4,00 | | 0,98 €/m ² | 3,92 € |
| Relleno grava o material granular de 50-70 mm | 1,00 | 0,45 | 0,90 | 17,14 €/m ³ | 6,94 € |
| Terreno mejorado y compactado en tongadas de 10 a 20 cm | 1,00 | 0,45 | 2,00 | 13,51 €/m ³ | 12,159 € |
| Geotextil de refuerzo estructural cada 50 cm | 1,00 | 5,50 | | 4,27 €/m ² | 23,485 € |
| Tubos de drenaje horizontal para evacuación del agua del interior del talud de 230 mm | 1,00 | | | 6,29 €/ml | 6,29 € |
| Tubos de drenaje horizontal de evacuación de agua del interior del talud | 2,80 | | | 6,80 €/ml | 0 € |
| Muro gavión malla hexagonal de triple torsión de 2,5 m de altura medidas 0,5 × 1,0 × 1,5 m ³ | 1,00 | 2,50 | | 420,00 €/ud | 420,00 € |
| Total | | | | | 481,56 €/m² |
| Sistemas de contención vertical | | | | | |
| Acondicionamiento del terreno | 1,00 | 1,75 | 0,80 | 59,20 €/m ³ | 82,88 € |
| Geotextil | 1,00 | 2,60 | | 1,22 €/m ² | 3,17 € |
| Tubo drenaje de 230 mm | 1,00 | | | 6,29 €/ml | 6,29 € |
| Relleno de grava o material granular | 1,00 | 1,50 | 0,60 | 17,14 €/m ³ | 15,43 € |
| Total | | | | | 107,77 €/m² |

9. Caminos

Los caminos son vías de comunicación que modifican la gestión del agua de lluvia y su ciclo natural. En este apartado se proponen medidas para mantener el comportamiento del agua previo a la ejecución del camino, así como soluciones que permitan el aprovechamiento, captación e infiltración del agua recogida. Para ello se pretende ralentizar la escorrentía, evitar las concentraciones puntuales y generar zonas de almacenamiento temporal.

Los condicionantes climatológicos y geomorfológicos de cada ubicación, las características de los usuarios (peso del vehículo, maniobras...), la frecuencia de uso y la necesidad de mantenimiento hacen precisa una clasificación diferenciada de los modelos de caminos para poder determinar las soluciones más adecuadas en cada caso.



Figura 235. Camino en El Pardo, Madrid.

9.1. Justificación

Muchos de los problemas en los caminos están provocados por el agua. Una buena gestión y diseño pueden prevenir:

La alteración del curso natural del agua

El camino, especialmente en topografías irregulares, modifica el recorrido natural del agua, por lo que un diseño adecuado evita importantes interrupciones de sus movimientos naturales. La inclusión de barreras territoriales desequilibra al flujo existente, aumentando la presión hidrostática en unas zonas y eliminando su presencia en otras.

La durabilidad del camino

Afectada principalmente por la erosión producida por la lluvia, el viento, la nieve o el hielo, aunque también por el tránsito de vehículos. Los materiales del firme y de la base soporte deben adecuarse a las condiciones climáticas y al tipo de usuario. La erosión superficial o del terreno colindante y la formación de charcos por drenaje inadecuado son los principales enemigos de la superficie del camino.

La desnaturalización

El camino es una alteración del ecosistema previo que genera nuevas barreras para la flora y fauna de la zona. Algunas de las medidas correctoras pueden consistir en la elección de un trazado poco agresivo, la inclusión de corredores verdes perpendiculares al camino, la plantación de vegetación autóctona en los márgenes y en el terreno colindante o la creación de zonas puntuales de almacenamiento de agua como focos de biodiversidad (balsas artificiales).



Figura 236. Talud lateral erosionado.



Figura 237. Cárcavas por agua.



Figura 238. Cuneta impermeable.



Figura 239. Charcos en superficie.

9.2. Tipología

Existen varios tipos de camino: el forestal, el rural, la senda peatonal o ciclista y la vía pecuaria. Los criterios de diseño se basan principalmente en la frecuencia de uso, la carga que soporta y sus dimensiones, aunque también se debe tener en cuenta el terreno colindante y la pendiente del mismo.

El terreno colindante

En un camino con cota inferior a la del terreno colindante se debe controlar la escorrentía de las laderas próximas y la formación de charcos. En caminos situados a la misma cota que el terreno colindante hay que prestar atención a la correcta evacuación del agua. En caminos con cota superior a la del terreno el objetivo será evitar la erosión del firme y la pérdida de material.

La pendiente del camino

La pendiente del camino –inclinación en la que se mantiene la estabilidad del terreno sin deslizamientos– está directamente relacionada con el ángulo de rozamiento interno, por lo que el nivel de cohesión de los materiales que conforman el terreno influye decisivamente en la pendiente longitudinal, mientras la pendiente transversal está supeditada a la accesibilidad y el tránsito. La pendiente transversal puede ser con vertido a un lateral (en caminos con ancho reducido) o a dos laterales (en caminos de mayores dimensiones). La pendiente máxima recomendada no debe superar el 6 %

y debe permitir una correcta evacuación del agua al perímetro, evitando la formación de charcos en la superficie transitable.

Como se ha comentado anteriormente, la pendiente longitudinal está condicionada por su topografía y por las propiedades del terreno sobre las que se construye el camino, y se recomienda que sea superior al 2 %. En situaciones de fuerte pendiente longitudinal se debe prestar especial atención a los drenajes laterales del camino, evitando las acumulaciones de agua que pueden generar desplazamientos. La pendiente máxima a utilizar en caminos secundarios y terciarios es del 15 %, mientras que en accesos y zonas transitables principales no debe superar el 10 %. En emplazamientos con precipitaciones muy elevadas y nivel de cohesión de terreno muy bajo no es recomendable superar pendientes mayores al 8 %, especialmente si se trata de caminos transitados por vehículos.

En todo camino encontramos una zona transitable, una zona de cuneta, una zona de terreno colindante y los conectores entre cunetas.

La zona transitable del camino es la superficie firme por donde se produce el tránsito. Se debe garantizar su mantenimiento, la accesibilidad y la correcta evacuación del agua para evitar la formación de charcos y la erosión del firme.

| | Tipo de camino | | |
|-------------------------------------------------------------|--------------------|------------|-----------|
| | Acceso y principal | Secundario | Terciario |
| Pendiente longitudinal máxima (%) | < 10 | < 15 | < 15 |
| Curvas horizontales (m) | > 25 | > 10 | > 10 |
| Pendiente transversal (%) | 3-5 | 3-5 | — |
| Ancho de la plataforma (m) | 8 | 6 | 4 |
| Ancho de la calzada (m) | 5 | 4 | 4 |
| Espesor del terreno estabilizado (cm) | 25-40 | 20-30 | — |
| Pendiente del talud en tierra (alto:ancho) | 2:1 | 2:1 | 2:1 |
| Pendiente del talud en roca (alto:ancho) | 4:1 | 4:1 | 4:1 |
| Ancho de los elementos perimetrales de recogida de agua (m) | 1 | 0,5-1 | — |

Figura 240. Recomendaciones de diseño en función de la pendiente longitudinal del camino (FAO).

La cuneta es la zona lateral donde se recogen tanto las aguas evacuadas por el camino como por los terrenos colindantes. La recomendación general es que tengan una proporción 1/2 (alto/ancho) de modo que permita la evacuación y la infiltración, además de garantizar la seguridad vial. La cuneta de materiales porosos y permeables permite infiltrar y amortiguar la escorrentía.

El terreno colindante determina las dimensiones de la cuneta y el acabado superficial de la zona de tránsito.

La conexión entre cunetas evita la saturación, la formación de charcos, el desplazamiento del terreno y la erosión provocada por la acumulación de la escorrentía. Para evitarlo se utilizan subdrenes o conectores transversales que comunican ambos lados del camino.

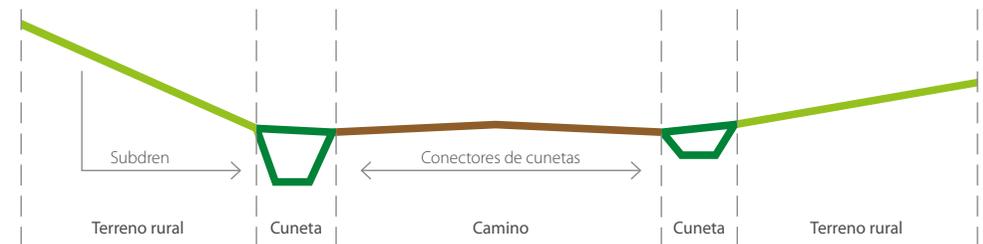


Figura 241. Elementos configuradores del camino.

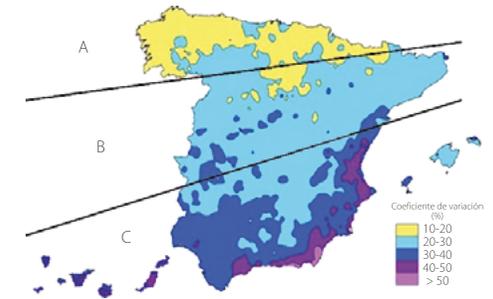
9.3. Recomendaciones de diseño

La climatología del lugar y la permeabilidad del terreno determinan las estrategias a adoptar en el diseño del camino y se debe tener en cuenta que las mejoras de alguno de sus elementos configuradores tiene repercusión en el resto.

Las recomendaciones según el terreno y la zona climática son:

| | Precipitaciones (mm) | | | |
|--------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| | Precipitación media (mensual) | Precipitación media (anual) | Precipitación máxima | Precipitación mínima |
| Zona A | 79,14 | 949,72 | 357,86 | 0,50 |
| Zona B | 37,47 | 449,58 | 221,89 | 0,00 |
| Zona C | 32,92 | 395,05 | 304,64 | 0,00 |

Figura 242. División geográfica según la variación de la precipitación.



| Recomendaciones de diseño según el terreno y la zona climática | | | |
|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Zona A | Zona B | Zona C |
| Terreno impermeable | <ul style="list-style-type: none"> – Incremento de la permeabilidad en la capa superficial transitable. – Control de la evacuación subsuperficial. – Uso de cunetas protegidas e interconectadas. – Conducción del agua a zonas puntuales de almacenamiento e infiltración. | <ul style="list-style-type: none"> – Incremento de la permeabilidad en la capa superficial transitable y protección de las capas superficiales frente a fuertes precipitaciones. – Uso de cunetas protegidas e interconectadas y conducción del agua a las zonas con mayor capacidad de almacenamiento e infiltración. – Medidas correctoras en terrenos colindantes para la ralentización de la escorrentía en las tormentas. | <ul style="list-style-type: none"> – Protección de las capas superficiales frente a fuertes precipitaciones. – Evacuación perimetral de gran capacidad para absorber las fuertes precipitaciones. – Medidas correctoras en los terrenos colindantes para la ralentización de la escorrentía en las tormentas. |
| Terreno permeable | <ul style="list-style-type: none"> – Incremento de la permeabilidad en la capa superficial transitable. – Evacuación perimetral con cuneta filtrante de alta capacidad de infiltración. – Uso de cunetas protegidas e interconectadas. – Aumento de la permeabilidad y acumulación en terrenos perimetrales. | <ul style="list-style-type: none"> – Incremento de la permeabilidad en la capa superficial transitable y uso de material estable ante fuertes precipitaciones. – Evacuación perimetral con cuneta filtrante de alta capacidad de infiltración. – Aumento de la permeabilidad y de la acumulación en los terrenos perimetrales. – Medidas correctoras en los terrenos colindantes para la ralentización de la escorrentía en las tormentas. | <ul style="list-style-type: none"> – Empleo de material superficial estable ante fuertes precipitaciones. – Evacuación perimetral con cuneta de alta capacidad de infiltración. – Medidas correctoras en terrenos colindantes para la ralentización de la escorrentía en las tormentas. – Incorporación de zonas de detención y almacenamiento temporal de gran volumen. |

Se recomienda ralentizar e infiltrar el agua del camino y del terreno colindante, evitar las superficies impermeables, adecuar el acabado a la climatología de la zona y al tránsito de los vehículos, incluir vegetación autóctona y unir las cunetas mediante conectores.

Con estos objetivos se proponen las siguientes recomendaciones de diseño para cada elemento configurador:

La zona transitible. Debe ser una superficie resistente al tránsito, a la acción de lluvia y a la escorrentía. Además, debe garantizar la evacuación del agua a las cunetas perimetrales. Se recomienda incrementar la permeabilidad superficial con acabados discontinuos que favorezcan la infiltración al terreno.

La cuneta. Debe transportar el agua, ralentizar su recorrido e infiltrarla al terreno. Para ello se recomienda utilizar cunetas vegetadas rellenas de material granular con tuberías drenantes y recubiertas de grava o incluso celdas prefabricadas de infiltración. También debe considerarse la seguridad de los vehículos y los usuarios por lo que se recomiendan cunetas tendidas o cubiertas hasta la cota de la zona de tránsito.

El terreno colindante. Debe incorporar medidas correctoras para la retención e infiltración de la escorrentía con el objeto de mejorar el comportamiento del propio camino y de sus cunetas. Se recomienda la plantación en hilera, las bermas, los caballones o las zanjas filtrantes paralelas al camino. Para ello se puede utilizar el terreno excavado durante el movimiento de tierra para la ejecución del camino.

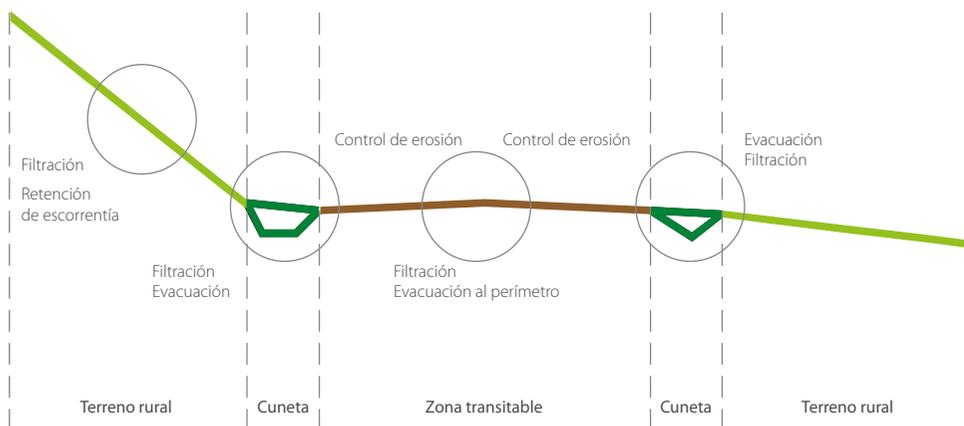


Figura 243. Recomendaciones en cada elemento del camino.



Figura 244. Zona inundable en vía pecuaria.



Figura 245. Balsa de almacenamiento temporal junto al camino.



Figura 246. Cuneta con materia granular de relleno.

9.4. Ejemplo representativo

Para un camino en la Zona climática B con terreno permeable y con precipitaciones esporádicas de intensidad media se proponen las siguientes medidas:

| El incremento de la permeabilidad de la capa superficial transitable.

| La evacuación perimetral con una cuneta filtrante de alta capacidad de infiltración.

| El aumento de la permeabilidad y la acumulación en terrenos perimetrales.

| La ralentización de la escorrentía en los terrenos colindantes.

El tramo de camino del ejemplo se encuentra rodeado por un terreno natural impermeable de pendiente moderada en un lateral y por terreno permeable de pequeña pendiente y con vegetación.

Con estas premisas las soluciones recomendadas son las siguientes:

| **La zona transitable.** Acabado con agregado triturado y grava compactada sobre base de zahorra. Esta solución permite disminuir la erosión por el impacto de la lluvia, posibilita la infiltración al terreno natural y evita la aparición de charcos.

| **La cuneta a la cota de la zona transitable.** Su sección debe ser capaz de evacuar el agua de escorrentía del terreno, que tiene mucha pendiente y es poco permeable. Se recomienda incorporar un tubo drenante perforado con lámina geotextil y recubierto de grava hasta la cota de la zona de tránsito, que permita la infiltración al terreno.

| **La cuneta a cota inferior respecto de la zona transitable.** Se propone una cuneta tendida con acabado vegetal, con continuidad con la superficie del camino, evitando discontinuidades y evacuando el agua excedente.

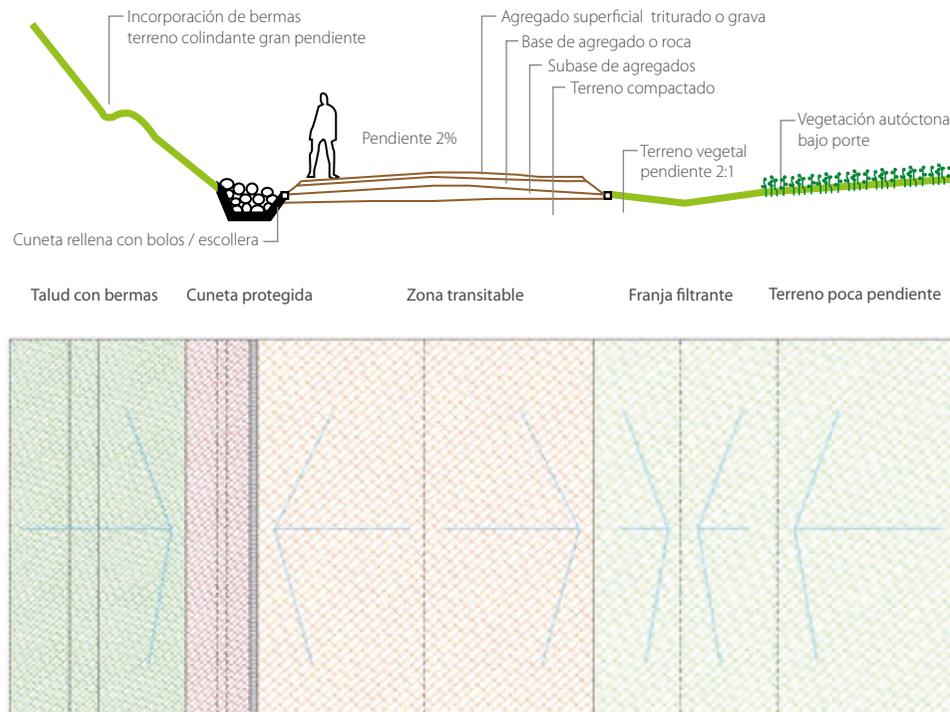
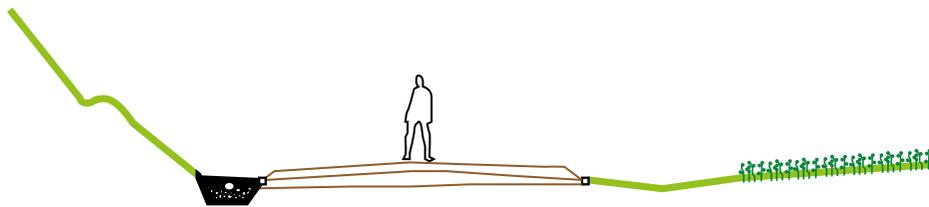


Figura 247. Esquema del tramo de camino y planta.



En la siguiente tabla se indica el coste estimado orientativo de una franja de un metro de ancho para cada elemento descrito.

Figura 248. Detalle de los elementos complementarios.

El terreno colindante impermeable de gran pendiente. Genera grandes volúmenes de escorrentía y para minimizarlo se propone incorporar bancales o bermas que aumenten la capacidad de infiltración y proteger el encuentro con la cuneta mediante diferentes capas de grava con diversa granulometría (colocando los diámetros mayores en la superficie).

| Cuneta protegida | Dimensiones | | | Precio unitario | Total |
|-------------------------------------------------|-------------|------|------|------------------------|---------------------------------------------|
| Acondicionamiento del terreno | 1,00 | 1,75 | 1,00 | 59,20 €/m ³ | 103,60 € |
| Relleno de zanja (piedra de escollera 10-30 cm) | 1,00 | 1,75 | 1,00 | 23,64 €/m ³ | 41,37 € |
| Total | | | | | 79,24 € (82,84 €/m ²) |

El terreno colindante permeable de pequeña pendiente. Se favorece la infiltración directa del agua y la retención de la humedad en capas superficiales, además del crecimiento de la vegetación autóctona, que contribuye a la cohesión del terreno y a la amortiguación de la escorrentía.

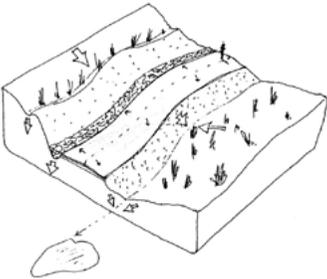
| Zona transitante | Dimensiones | | | Precio unitario | Total |
|-------------------------------------------|-------------|------|------|------------------------|----------------------------------------------|
| Acondicionamiento del terreno | 1,00 | 6,50 | 0,40 | 59,20 €/m ³ | 153,92 € |
| Agregado superficial de grava o triturado | 1,00 | 6,50 | 0,05 | 20,25 €/m ³ | 6,58 € |
| Base de agregado o roca | 1,00 | 6,50 | 0,20 | 17,14 €/m ³ | 22,28 € |
| Sub-base de agregados | 1,00 | 6,50 | 0,20 | 17,14 €/m ³ | 22,28 € |
| Total | | | | | 254,78 € (39,20 €/m ²) |

Los elementos complementarios. La incorporación de pequeñas zonas de lagunaje que actúen como espacios de biorretención del agua excedente completa las actuaciones para la mejora del tratamiento del agua y añade un valor paisajístico y ecológico a la construcción del camino.

| Berma de infiltración al terreno | Dimensiones | | | Precio unitario | Total |
|----------------------------------|-------------|------|------|------------------------|---------------------------------------------|
| Acondicionamiento del terreno | 1,00 | 0,60 | 0,40 | 59,20 €/m ³ | 14,21 € |
| Total | | | | | 14,21 € (23,68 €/m ²) |

9.5. Ficha comparativa

Camino de 5 m de ancho y 500 m lineales en Zona climática B con precipitación anual de 450 mm.

| | Características de la instalación | Coste de la instalación | Gestión con aprovechamiento de agua | Impacto ambiental |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>INSTALACIÓN ESTÁNDAR</p>  | <ul style="list-style-type: none"> – Camino de asfalto. – Cuneta prefabricada de hormigón de 100 x 20 cm a cada lado. | <ul style="list-style-type: none"> – Coste de 1 m lineal: 295 €. – Coste del asfalto: 225 €. – Coste de las cunetas de hormigón prefabricado: 70 €. | <p>Concentración volumen elevado por escorrentía:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Camino: $5 \text{ m} \times 500 \text{ ml} \times 450 \text{ mm} \times 0,90 = 1.012.500 \text{ l/año}$. – Cuneta receptora: $2 \times 1 \text{ m} \times 500 \text{ ml} \times 450 \text{ mm} \times 0,90 = 405 \text{ l/año}$. <p>Volumen total por escorrentía: $1.012.500 + 405.000 = 1.417.500 \text{ l/año}$.</p> | <ul style="list-style-type: none"> – Nula amortiguación de escorrentía. – Coeficiente de escorrentía en asfalto y hormigón (0,9). – Efecto "isla de calor". – Ausencia de aprovechamiento, almacenamiento e infiltración de agua. |
| <p>CON APROVECHAMIENTO DE AGUA</p>  | <ul style="list-style-type: none"> – Camino de zahorra compactado. – Cuneta filtrante en zona receptora con grava y dren perforado. – Cuneta tendida vegetal en vertiente. – Balsa lateral (con movimiento tierra) para almacenamiento e infiltración temporal de 100 m^3 cada 0,5 km. – Berma vegetada lateral paralela a 5 m del camino en cota superior. | <ul style="list-style-type: none"> – Coste de 1 m lineal: 260 €. – Camino de la zahorra: 205 €. – Cuneta filtrante: 20 €. – Cuneta tendida: 10 €. – Berma vegetal: 15 €. – Balsa permeable de 100 m^3 cada 0,5 km: 5.000 € (10 €/m³). | <ul style="list-style-type: none"> – Riego desde balsa a la berma y cuneta vegetal. – Reducción de la escorrentía del camino al 0,70. – Reducción de la escorrentía de la cuneta receptora al 0,60 y de la cuneta tendida al 0,70. – Volumen total por escorrentía: $787.500 + 292.500 \text{ l/año}$. – Reducción volumen escorrentía (23,8 %): 337.500 l/año. | <ul style="list-style-type: none"> – Amortiguación de vertido por ralentización, infiltración y almacenamiento. – Disminución del mantenimiento y mejora ambiental de entorno. – Inclusión de vegetación con riego. |

* Importe saneamiento y abastecimiento conforme a tarifas del agua (AEAS).

10. Instalaciones

Este capítulo analiza las diferentes zonas destinadas a instalaciones de almacenamiento de material, explotaciones ganaderas o zonas deportivas. Todas ellas tienen en común ser grandes consumidoras de suelo y tener elevadas necesidades de agua.

Las zonas para almacenamiento de material ocupan extensiones de terreno con elevado tráfico rodado que generalmente están totalmente impermeabilizadas con acabados superficiales de hormigón o asfalto. Las explotaciones ganaderas utilizan grandes cantidades de agua en abrevado, baldeo y limpieza. Por su parte, las instalaciones deportivas son dotaciones presentes en todas las poblaciones, con grandes superficies cubiertas e instalaciones al aire libre y que precisan de riego para su correcto mantenimiento.



Figura 249. Almacenamiento.

10.1. Justificación

La problemática asociada a este tipo de instalaciones se debe a los siguientes factores:

La escorrentía

La superficie con acabado impermeable disminuye la capacidad de infiltración de agua y de evapotranspiración natural. Cuando las precipitaciones son intensas se produce un incremento de la escorrentía superficial que satura las redes de alcantarillado y arrastra los contaminantes depositados en suelo.

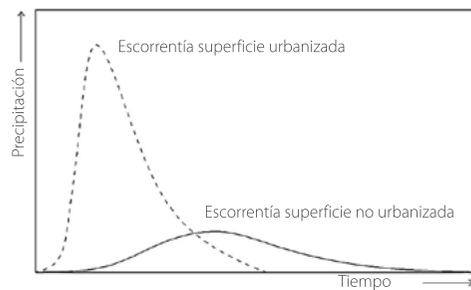


Figura 250. Escorrentía en superficie no urbanizada frente a superficie urbanizada.

La normativa

La normativa específica que regula el tratamiento de agua pluvial en estas instalaciones es escasa.

La contaminación difusa

Se acumula especialmente en superficies con tráfico rodado y se debe a los metales pesados, los hidrocarburos y los aceites. El almacenamiento de sustancias peligrosas o la concentración de purín en explotaciones ganaderas deben ser especialmente considerados en el diseño.



Figura 251. Contaminación por concentración de purines.

La desnaturalización del entorno

Las grandes superficies impermeabilizadas alteran el territorio disminuyendo la flora y la fauna, modificando los parámetros del confort ambiental, afectando a la calidad del agua y provocando la pérdida de cohesión del terreno.



Figura 252. Puerto seco en Madrid.

El efecto "isla de calor"

Tanto el asfalto como el hormigón tienen gran capacidad de absorción térmica y contribuyen significativamente al fenómeno "isla de calor", elevando la temperatura hasta 7 °C y dificultando la disipación nocturna.

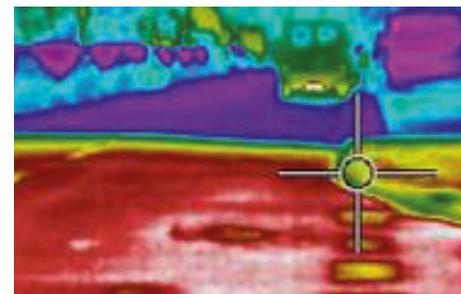


Figura 253. Termografía de superficie asfaltada.

La jerarquía superficial

En estas instalaciones prevalecen las soluciones constructivas de gran rapidez de ejecución y se utiliza el aglomerado asfáltico o la mezcla bituminosa impermeable, sin diferenciar pavimentos de viales o zonas de estacionamiento. Tampoco se utiliza la vegetación o la banda vegetal vinculada a la gestión del agua que permiten mejorar las condiciones ambientales y la calidad del agua de la superficie asociada.



Figura 254. Almacenamiento de vehículos en desguace.

Almacenamiento de material

10.2. Tipología

El objeto almacenado permite diferenciar entre el almacén de residuos especiales y el centro de almacenamiento o intercambio de productos. Las instalaciones más usuales son:

Tipología de almacenamiento

Almacenamiento de residuos

- Punto limpio
- Desguace
- Neumáticos

Almacenamiento de productos

- Materiales de construcción
- Mercancías: Puerto
- Zona de Actividades Logísticas (ZAL)
- Mercado de mayoristas

El punto limpio

Es una instalación destinada al tratamiento de residuos no convencionales para su valorización o su eliminación y suele contar con zonas diferenciadas: contenedores de gran tamaño, la zona cubierta y la zona cerrada para residuos tóxicos o peligrosos. El recinto tiene control de acceso y horario restringido. El acabado superficial es habitualmente impermeable de hormigón y los contenedores son estancos.



Figura 255. Zona cubierta de punto limpio.



Figura 256. Zona exterior de punto limpio.

La Ley 10/1998 fija los parámetros de cumplimiento mínimos y otorga competencias a las Comunidades Autónomas para la elaboración de los planes autonómicos de residuos y la autorización, vigilancia, inspección y sanción de las actividades de producción y gestión de

residuos. En cuanto al agua, la normativa indica que se debe disponer de contenedores estancos y de un separador de grasas. La prioridad debe ser el control de los vertidos tóxicos y por ello habitualmente se impermeabiliza el conjunto, creando una superficie estanca.

El centro autorizado de tratamiento de vehículos (CAT)

Es una instalación destinada al desmantelamiento de vehículos desechados, la reutilización de sus componentes y la gestión de los residuos. Las piezas funcionales recuperadas son vendidas para su uso en otros vehículos, mientras que las partes metálicas inútiles reciben un procesado inicial para venderse como chatarra a otras industrias de reciclaje.

Desde la recepción del vehículo hasta su descontaminación y desmontaje, el vehículo se considera un residuo peligroso. Los residuos obtenidos se almacenan para ser entregados a gestores autorizados, y las piezas y componentes que puedan ser reutilizados o reciclados se almacenan. Los vehículos descontaminados quedan almacenados a la espera de ser compactados para su posterior fragmentación.



Figura 257. Zona interior de almacenamiento en CAT.



Figura 258. Zona de desmontaje en CAT.



Figura 259. Almacenamiento exterior en CAT.

Habitualmente los CAT disponen de:

- | **Zona interior** de descontaminación, desmontaje, almacenamiento de las piezas y los componentes y almacenamiento de los residuos.
- | **Planta fragmentadora** para la separación por densidad de residuos pesados.
- | **Zona exterior cubierta** para la verificación, la recepción y el almacenamiento de piezas, componentes y residuos.
- | **Zona exterior descubierta** para almacenamiento de la carrocería del vehículo descontaminado.

El Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2007-2015 se marca como objetivo la recogida, revalorización y reciclado de casi el 100 % del peso medio por vehículo y la creación de una red de Centros Autorizados de Tratamientos de Vehículos regulados. La mayoría de centros se encuentran en proceso de adaptación a la nueva legislación.

En cuanto a la gestión del agua, la normativa indica que será un lugar impermeabilizado en toda su superficie, exceptuando la zona en la que queda la carrocería del vehículo, libre ya de todos los elementos tóxicos y contaminantes.

Las aguas recogidas en las zonas impermeables deben ser tratadas antes de ser vertidas a la red de saneamiento. La solución habitual es la total impermeabilización del recinto.

El almacén de neumáticos fuera de uso

Es una instalación destinada para el almacenamiento temporal restringido de neumáticos fuera de uso (NFU), a la espera de ser triturados, valorizados o quemados. Está regulada por el Real Decreto 1619/2005 de Gestión de NFU y puede incorporar también las funciones de una planta para la eliminación de NFU o para la valorización de estos mediante su trituración para su reutilización posterior.



Figura 260. Almacén de neumáticos fuera de uso.

La instalación debe estar alejada de zonas forestales o herbáceas y de otras instalaciones industriales para evitar la propagación de los

incendios. El acceso es restringido, debe estar adecuado para el tránsito de vehículos pesados y la zona destinada al almacenamiento estará aislada del resto. Los neumáticos deben protegerse de los agentes exteriores, los insectos y los roedores y su altura máxima de apilamiento es de 3 m si están aislados y de 6 m cuando están almacenados dentro de silos.



Figura 261. Descarga de neumáticos.



Figura 262. Almacenamiento de neumáticos.

Los centros de gestión de NFU disponen habitualmente de:

- | **Zona interior cubierta** cerrada para el procesado (triturado o granulado) y recauchutado de los neumáticos.
- | **Zona exterior al aire libre** para la recogida, la recepción y la clasificación.
- | **Zona de almacenamiento** aislada del resto de la instalación.

La Ley 10/1998 de 21 de abril de Residuos, cataloga los NFU como residuo peligroso por lo que en las zonas de almacenamiento, los



Figura 263. Almacén de materiales de construcción.

accesos y los viales precisan de sistemas específicos de gestión del agua, de superficies con acabados debidamente compactados y acondicionados, de sistemas de recogida de aguas superficiales derivados a la red de saneamiento y de un solar compartimentado en calles para la circulación de vehículos.

El almacén de material de construcción

Se trata de una instalación destinada al almacenamiento o exposición temporal de diversos materiales de construcción y maquinaria. Cuentan con zonas cubiertas y zonas a la intemperie donde habitualmente se opta por la impermeabilización de la superficie y, en la mayoría de los casos, hay ausencia de gestión y tratamiento del agua.

El puerto

Es una instalación marítimo-terrestre organizada como nodo de servicios para el flujo de mercancías, dando además abrigo y seguridad a las embarcaciones. Pueden incluir usos portuarios (pesquero, construcción y reparación naval, comercial o náutico-deportivo) y otros alternativos como edificio de oficinas. Cuenta con naves de grandes dimensiones con usos diversos como el centro de coordinación de servicios (capitanía marítima, depósitos, almacenes, lonja, talleres de reparación o aduana), o la zona de almacenamiento temporal de mercancías dotada de elementos auxiliares como grúas, carretillas elevadoras, porta-contenedores, acopladores y cintas transportadoras.



Figura 264. Vista aérea de puerto marítimo.

La Ley 27/1992 de Puertos del Estado y de la Marina Mercante recoge la gestión de agua pluvial y La Guía de buenas prácticas para la ejecución de obras marítimas (2008) recomienda únicamente que para la evacuación de aguas superficiales de la zona del muelle se disponga de la pendiente adecuada y se instalen drenes y cunetas.



Figura 265. Almacén de contenedores cubierto.



Figura 266. Almacenamiento exterior de contenedores.

La zona de actividad logística (ZAL)

Es un espacio situado junto a un puerto marítimo o seco, especializado en la distribución de mercancías y asociado a nudos de tránsito.

Combina diferentes modos de transporte y dispone de áreas de servicios, los servicios especializados y aduaneros, las áreas logísticas, las zonas de transferencia y distribución, las áreas intermodales, las edificaciones y las zonas cubiertas.

El mercado mayorista

Se trata de una instalación para la distribución de productos alimentarios perecederos situada en las afueras de núcleos de población.

La "Guía de buenas prácticas para autoridades de mercados", redactada por WUMW (Grupo de Trabajo de la Unión Europea de la Unión Mundial de Mercados Mayoristas) no indica

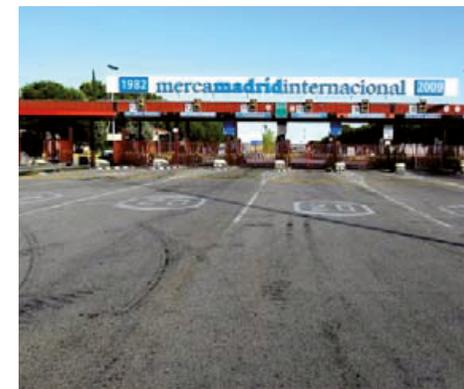


Figura 267. Acceso a Mercamadrid.

recomendaciones respecto al tratamiento del agua pluvial pero apunta que:

- | El suministro de agua debe ser de calidad potable para cualquier operación relacionada con los alimentos.
- | La dirección del flujo de los desagües debe ir de las áreas limpias a las áreas sucias.
- | Los desagües deben tener suficiente caída para permitir que todos los residuos sólidos y líquidos fluyan.
- | Los aseos deben formar parte de un servicio separado de los desagües de las salas de preparación de alimentos.
- | Los residuos líquidos no deben ir directamente al sistema de drenaje.
- | En cualquier operación en contacto con alimentos se empleará agua potable.
- | El agua reciclada debe someterse a tratamiento previo al vertido a la red general.

10.3. Recomendaciones de diseño

Los objetivos generales son diferenciar las superficies según la permeabilidad adecuada al uso, asegurar la calidad del agua de lluvia e incorporar el pretratamiento en el recorrido del agua.

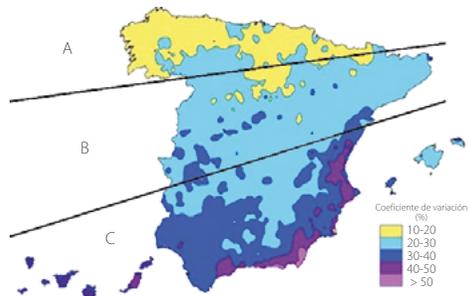
Cada tipología de almacenamiento tiene su propia problemática que condiciona el diseño.

| Objetivos generales en la zona de almacenamiento | |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Zona edificada | Recuperación de las aguas grises Recogida y utilización del agua pluvial en las cubiertas Incorporación de la vegetación en cubiertas y fachadas |
| Zona exterior | Tratamiento de las aguas superficiales contaminadas Jerarquización del acabado superficial Recogida y tratamiento del agua de la escorrentía. Inclusión de zonas de almacenamiento temporal (depósitos, balsas...) Inclusión de zonas verdes para pretratamiento del agua contaminada Infiltración de las aguas limpias al terreno |

| Problemática específica de la zona de almacenamiento | | |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Punto limpio | Exceso de impermeabilización Desaprovechamiento del agua de lluvia Desnaturalización | |
| Centro de tratamiento de vehículos (desguaces) | Adaptados a la normativa | Impermeabilización total Desaprovechamiento de aguas pluviales |
| | No adaptados a la normativa | Infiltración de contaminantes al terreno |
| Almacén de neumáticos fuera de uso | Adaptado a la normativa | Desaprovechamiento de aguas pluviales |
| | No adaptado a la normativa | Peligro de incendio por abandono Foco de infección Infiltración de lixiviados al suelo en caso de incendio |
| Almacén de material de construcción | Sin regulación específica | |
| | Impermeabilización total | Concentración de la escorrentía Colapso de la red de abastecimiento |
| | Ausencia de tratamiento superficial | Infiltración de contaminantes al terreno Mal drenaje del firme Degradación del suelo |
| Zona de actividad logística | Exceso de impermeabilización Ausencia de vegetación Concentración de la escorrentía y colapso de redes de saneamiento Efecto "isla de calor" | |

10.4. Ejemplo representativo

Zona de almacenamiento de materiales de construcción ubicada en Zona climática A en terreno permeable con una precipitación máxima de 357,86 mm, una precipitación media mensual de 79,14 mm y una precipitación media anual de 949,72 mm.



| | Precipitaciones (mm) | | | |
|--------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| | Precipitación media (mensual) | Precipitación media (anual) | Precipitación máxima | Precipitación mínima |
| Zona A | 79,14 | 949,72 | 357,86 | 0,50 |
| Zona B | 37,47 | 449,58 | 221,89 | 0,00 |
| Zona C | 32,92 | 395,05 | 304,64 | 0,00 |

Figura 268. División geográfica según la variación de la precipitación.

Los objetivos en esta instalación son infiltrar el máximo de agua posible en zonas sin riesgo de contaminación, almacenar el agua de cubierta para riego y baldeo, jerarquizar el pavimento conforme a usos y circulaciones y trasladar agua sucia a zonas de tratamiento por vegetación. Cada zona del recinto de almacenamiento de materiales de construcción incorpora diversas medidas para la gestión del agua pluvial.

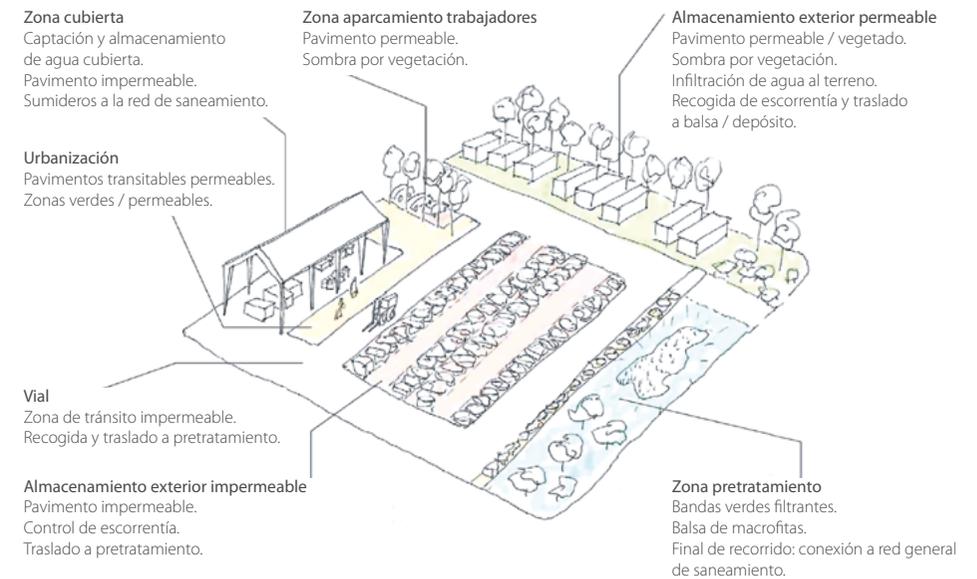


Figura 269. Elementos configuradores de la zona de almacenamiento.

Recomendaciones para diseño de almacenes de material de construcción

| Zona | Elementos | Recomendaciones |
|------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Zona de cubierta | Cubierta de chapa | Máxima capacidad de recogida y aprovechamiento |
| | Bajante con filtro incorporado | Tratamiento primario de agua |
| | Depósito de almacenamiento | Enterrado o de superficie Tipología de depósito según el origen del agua |
| | Almacenamiento de inertes | Pavimento permeable para infiltración al terreno |
| | Almacenamiento de sustancias peligrosas | Pavimento impermeable Control de la escorrentía |
| Urbanización | Zona peatonal | Pavimento transitable permeable |
| | Zona no transitable | Vegetación autóctona |
| | Zona de movimiento de carga | Pavimento resistente al tránsito de vehículos pesados Pavimento permeable o con control de la escorrentía |
| Vial | Acceso de usuarios | Pavimento resistente Pavimento permeable o con control de la escorrentía |
| | Aparcamiento | Pavimento permeable Sombra por vegetación |
| | Zona de movimiento de carga | Pavimento resistente al tránsito de vehículos pesados Pavimento permeable o con control de la escorrentía |
| | Almacén exterior | Permeable Impermeable |
| Zona verde | Vegetación autóctona | Plantación con necesidades hídricas acordes a la climatología |
| | Banda verde filtrante | Plantación con capacidad depuradora |
| | Balsa de almacenamiento | Almacenamiento temporal e infiltración Ralentización de la escorrentía |
| | Tratamiento vegetal (macrofitas) | Zonas de pretratamiento específico según los contaminantes |

Explotaciones ganaderas

10.5. Tipología

Los modos habituales de explotación y utilización del territorio son:

El pastoreo

Es el cuidado del ganado en el campo, donde se utilizan sistemas para almacenar y facilitar el abrevado del ganado a lo largo del territorio. Los sistemas habituales de almacenamiento del agua en el territorio son:

| El **pozo**, con profundidad variable y asociado a la zona de descanso o sestero.

| La **mina en escalera** es una excavación con acceso mediante una escalera que está situada junto a la rambla y la cañada.

| La **mina en horizontal** es una canalización o recogida de agua en la boca de la mina.

| La **cimbra y la galería** son conducciones subterráneas hasta la cota del nivel freático.

| La **boquera** es una presilla que actúa como el obstáculo del agua en el lateral del cauce de una rambla o un río.

| El **azud** es un muro transversal en el lecho del cauce para aflorar el agua sub-superficial.

| El **surco** es un corte en el terreno para redirigir el agua de lluvia a zonas determinadas.

| La **captación para aljibes** es una variación en el terreno para la reconducción del agua hasta el aljibe.

| La **fuelle, la balsa y el abrevadero** son cubetas de almacenamiento de agua para abrevar al ganado.

La explotación intensiva y extensiva

Conforme ha avanzado la demanda de productos cárnicos, la producción se ha convertido en el objetivo principal y la explotación ganadera se ha ido transformando para depender menos del pasto, la climatología y el entorno, hasta llegar a instalaciones con alto nivel de industrialización y elevadas necesidades hídricas.



Figura 270. Pastoreo.



Figura 271. Abrevadero prefabricado por el Grupo Tragsa.



Figura 272. Explotación ganadera intensiva.



Figura 273. Explotación ganadera extensiva.

En función de la superficie que ocupan se clasifican en:

| **La explotación extensiva.** Es una gran extensión de terreno con construcciones asociadas para la estabulación y la alimentación del ganado en la que se priorizan las zonas exteriores.

| **La explotación intensiva.** Desvinculada del terreno colindante, es una construcción específica altamente tecnificada, enfocada a maximizar el rendimiento y con gestión de la alimentación y los residuos.

Los elementos configuradores típicos de este tipo de explotaciones son:

| **El edificio estabulado interior.** Edificio cubierto y estancia principal del ganado.

| **El edificio de ordeño y explotación.** Edificio cubierto para ordeño o explotación de ganado.

| **El patio estabulado exterior.** Zona de control del ganado, contigua al edificio estabulado y generalmente con acabado superficial de hormigón.

| **El patio impermeable o arenado.** Zona controlada de esparcimiento, con control del purín y con limpieza periódica. El acabado superficial suele ser impermeable o de arena.

| **La zona de forraje.** Zona contigua al complejo ganadero que abastece de alimento al ganado.

| **La zona de esparcimiento.** Zona contigua al complejo ganadero con grandes dimensiones y sin medidas complementarias.

| **Los elementos auxiliares.** Fosos de agua o de pienso, silos de almacenamiento de productos manufacturados, etc.

| **El almacén de abono.** Zona de almacenamiento del estiércol, preferentemente cubierta.

| **El depósito o la balsa de purines.** Depósito o balsa impermeable con mantenimiento periódico.

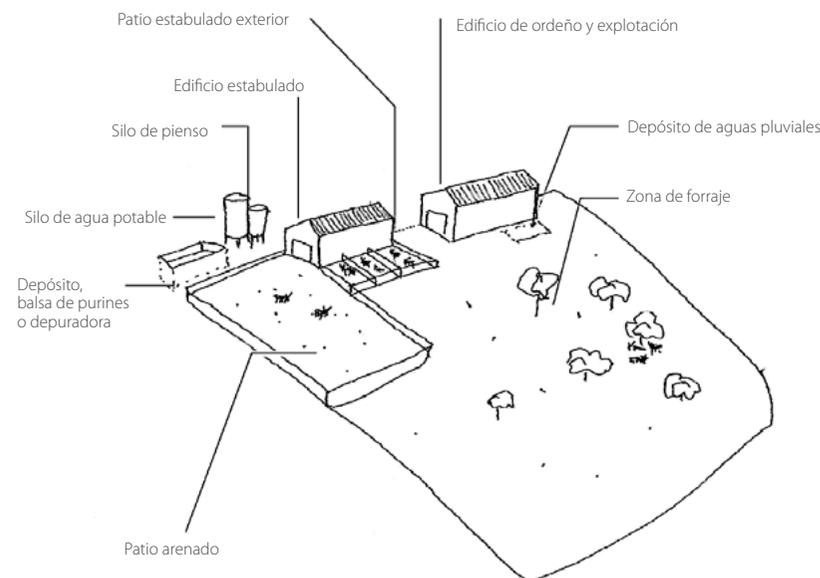


Figura 274. Elementos configuradores de una explotación ganadera.

10.6. Recomendaciones de diseño

El principal problema de este tipo de instalaciones está relacionado con la necesidad elevada de agua que requieren, principalmente las explotaciones intensivas.

En la siguiente tabla se recogen las necesidades hídricas en función del tipo de ganado para una explotación intensiva:

| Necesidades hídricas según especie (l/día) | |
|--------------------------------------------|--------|
| Caballo | 25-45 |
| Vaca seca (baja producción) | 45-55 |
| Vaca lechera (alta producción) | 80-130 |
| Novilla de 2 años | 38,0 |
| Oveja seca | 3,8 |
| Oveja de lactancia | 7,0 |
| Cordero de engorde | 2,0 |
| Cabra | 4,5-8 |
| Cerda gestante | 18-20 |
| Cerda lactante | 22-26 |
| Cerdo de engorde (45 kg) | 8-9 |
| Cerdo de engorde (90 kg) | 11-12 |
| Coneja (lactancia) | 0,6 |
| Conejo (macho adulto) | 0,3 |

Figura 275. Necesidades hídricas. *Curso Informaciones útiles en sanidad animal*, Raúl Galeno.

Y que se distribuyen habitualmente en las siguientes proporciones:



Figura 276. Explotación ganadera en Colmenar, Madrid.

| **El abrevado del ganado** puede alcanzar el 50 % del recurso hídrico necesario y dependerá del tipo de ganado, de las condiciones climatológicas y de la época del año. Generalmente para su cálculo se adopta como valor de referencia el 10 o 15 % del peso del animal.

| **La limpieza y el baldeo** representa el 30 % del agua consumida en la instalación y se utiliza para el mantenimiento de las instalaciones y las zonas de estabulado. La necesidad de agua para limpieza varía según la especie aunque, en este caso, el agua tiene menor exigencia de potabilización que el agua para abrevado.

| **El riego** supone el 18 % del consumo total y es necesario en las zonas de forraje y las zonas verdes de la explotación. Un valor orientativo $250 \text{ l}/(\text{m}^2 \times \text{año})$ que varía según la especie vegetal y la climatología.

| **El saneamiento** consume el 2 % del recurso hídrico necesario y se emplea en los vestuarios y los aseos anexos donde es recomendable instalar sistemas de recuperación de agua pluvial para su uso en las cisternas.

Siendo los problemas a considerar los recogidos en la siguiente tabla:

Con todo lo anterior, el principal objetivo en el diseño de estas instalaciones debe ser captar, almacenar y reutilizar la mayor cantidad de agua de lluvia posible, aunque nunca será suficiente para cubrir la demanda. Además, se debe salvaguardar la calidad del acuífero respetando, en la implantación de los elementos configuradores, las distancias mínimas a luga-

| Problemática específica en instalaciones ganaderas | | |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pastoreo | Abandono y deterioro de los elementos tradicionales. Ausencia de prácticas de aprovechamiento del agua en los entornos rurales. Ausencia de la figura del responsable de mantenimiento. | |
| Extensiva | Edificio estabulado interior | Ausencia de aprovechamiento y almacenamiento de las aguas pluviales de cubierta |
| Intensiva | Edificio de ordeño y explotación | Ausencia de aprovechamiento y almacenamiento de las aguas pluviales de cubierta |
| | Patio estabulado exterior | Contaminación de acuíferos por vertidos no controlados de purines |
| | Patio impermeable o arenado | Contaminación de acuíferos por vertidos no controlados de purines |
| | Zona de forraje | Ausencia de medidas correctoras o de almacenamiento del agua de lluvia |
| | Zona de esparcimiento | Ausencia de medidas correctoras o de almacenamiento del agua de lluvia Ausencia de zonas de agua en el exterior y falta de gestión de los purines |
| | Elementos auxiliares | Ausencia de depósitos de almacenamiento del agua pluvial |
| | Almacén de abono | Ausencia de aprovechamiento de las aguas pluviales de cubierta |
| | Depósito o balsa de purines | Falta de gestión o ausencia de tratamiento de los purines |

res sensibles y prestando especial cuidado en el tratamiento de los purines. En todo caso, cada actuación deberá adaptarse a las condiciones climatológicas y del terreno.

Estas recomendaciones se resumen en:

| Captar y almacenar el agua de las cubiertas, los caminos de acceso a la explotación y el terreno colindante, puesto que el consumo necesario es habitualmente mayor a la cantidad de agua recogida. Para el almacenamiento de la misma se pueden utilizar depósitos aéreos o enterrados y balsas.

| Utilizar el agua captada para el baldeo, la limpieza y el riego, conforme a los usos permitidos por la normativa. Utilizar el agua potable exclusivamente para el abrevado.

| Reducir los consumos de abrevado optimizando las instalaciones. El abrevadero debe ser específico de cada especie y tipo de cazoleta, debe estar colocado a la altura adecuada y contar con regulación del caudal.

| La minimización del purín generado. Incorporación del equipamiento adecuado en las edificaciones estabuladas para minimizar la generación de purín en volumen y en grado de contaminación.

| Captar, transportar y almacenar el purín en depósitos o balsas de almacenamiento impermeables.

| Gestión y tratamiento del purín. La gestión del purín debe ser controlada poniendo especial atención en el transporte y el vertido con camión, tractor con cisterna o tractor con remolque. Se recomiendan los tratamientos de depuración o biodigestión, la posibilidad de incorporar un tratamiento terciario de afino final, el uso del abono orgánico generado para enmienda orgánica y la reutilización del efluente para el riego y la limpieza.

| Incluir zonas de embalse de agua sin paso del ganado en los terrenos de esparcimiento, como el punto de recogida del agua desde terreno.

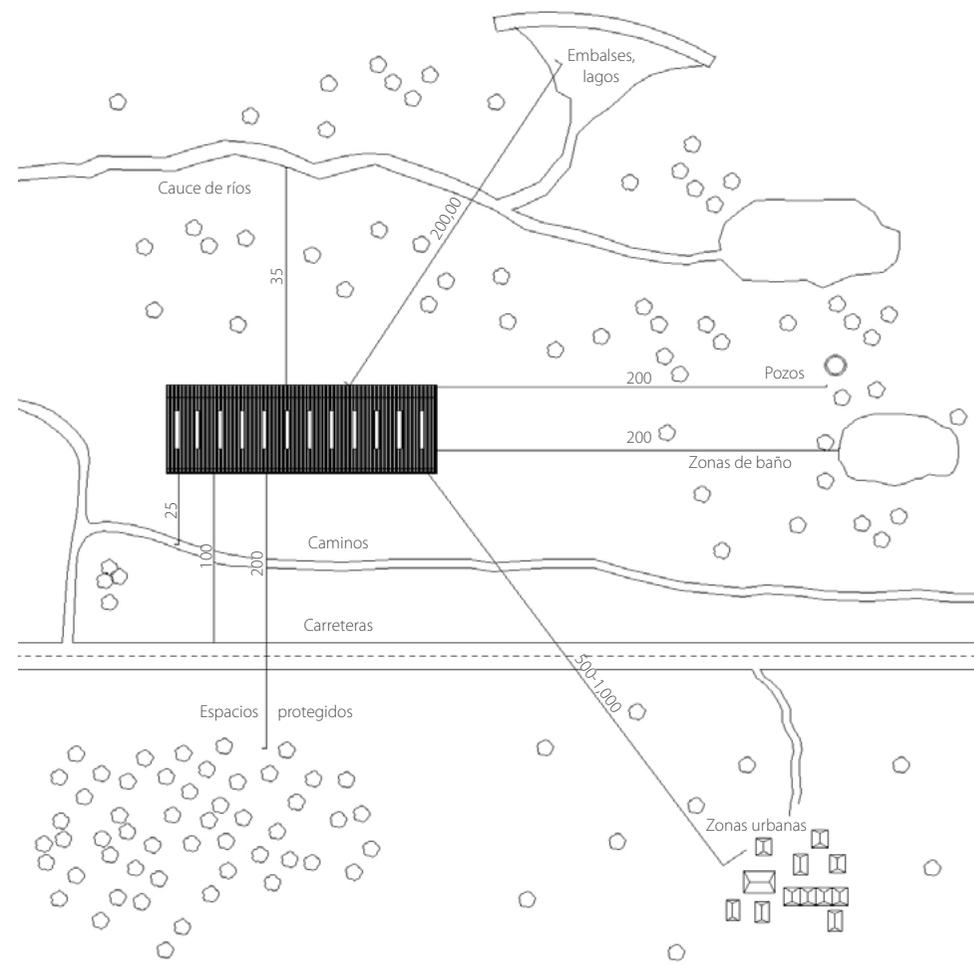
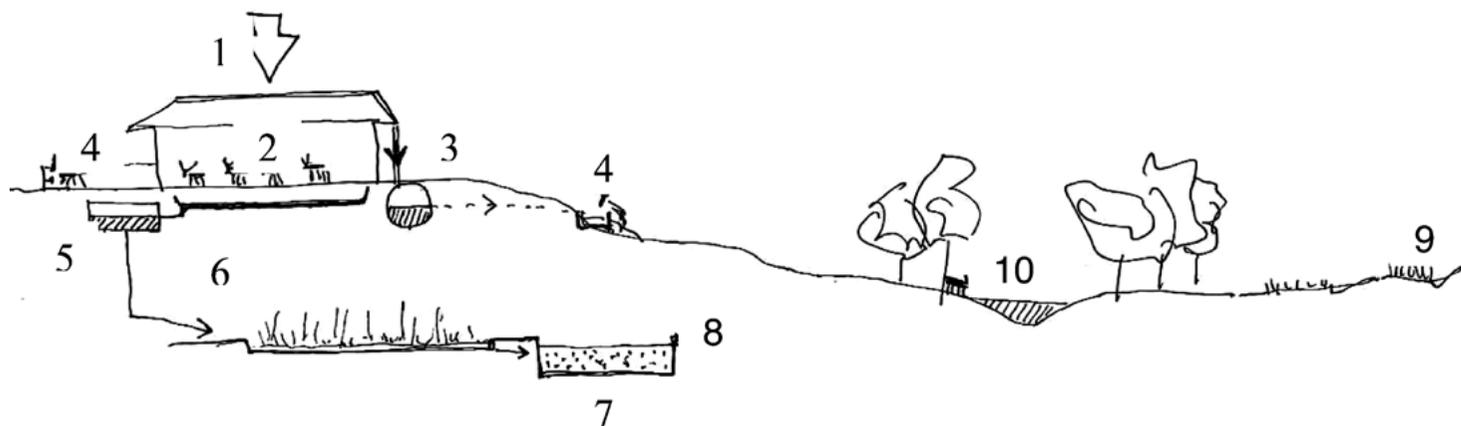


Figura 277. Distancias recomendables a puntos de almacenamiento de purines en explotaciones ganaderas según lo establecido por el Gobierno de Navarra.



(1) Captación de agua en cubierta. (2) Reducción de la generación de purín en los edificios. (3) Almacenamiento de agua pluvial y de la procedente de las escorrentías en los depósitos independientes. (4) Riego, saneamiento y limpieza. (5) Almacenamiento y gestión del purín. (6) Tratamiento de los purines generados. (7) Depósito o balsa para almacenar el purín tratado (efluente). (8) Reutilización del efluente para riego y limpieza. (9) Medidas de captación e infiltración de agua de escorrentía al terreno. (10) Balsa de almacenamiento de agua exterior.

Figura 278. Perfil de elementos configuradores para explotación ganadera.

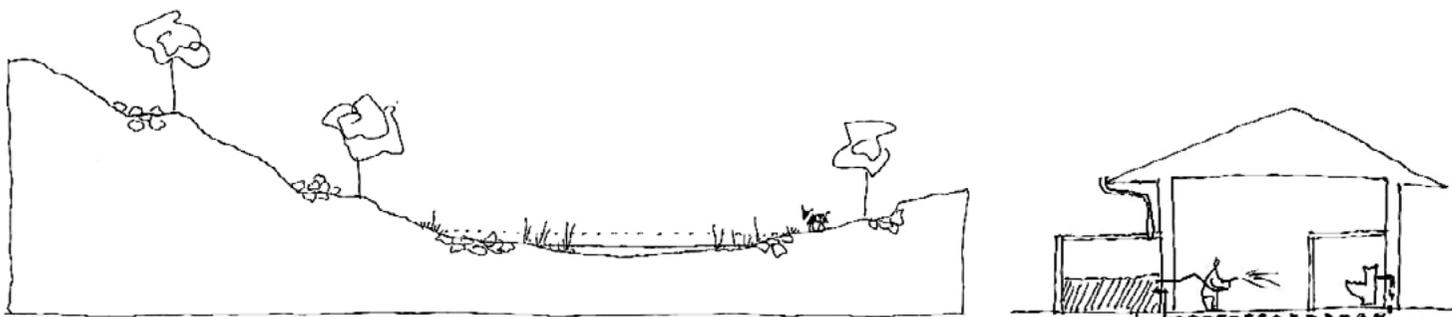


Figura 279. Almacenamiento del agua de lluvia en zonas de cota baja para su reutilización en limpieza de la explotación y uso en sanitarios.

10.7. Ejemplo representativo

Se toma como ejemplo tipo una explotación ganadera intensiva de 300 vacas lecheras con un consumo estimado de agua de 110 l/(vaca × día) formada por tres naves: estabulado (2.000 m²), de ordeño (2.000 m²) y almacén de estiércol (1.000 m²) en terreno permeable y Zona climática C.

El objetivo es, al igual que en el resto de zonas y tipologías de explotaciones ganaderas, acumular el máximo de agua para su utilización en la limpieza y el baldeo. Además, se incorporan las zonas de almacenamiento temporal de agua en el terreno colindante a la zona de explotación.

El esquema de actuación es:

| Captación de agua en la cubierta del edificio mediante bajante con filtro incorporado. Introducción de técnicas de minimización de purín en los edificios de explotación y el estabulado (1).

| Depósito de agua para la acumulación del agua de las cubiertas y la procedente de la escorrentía en depósitos independientes. Uso para el baldeo, la limpieza, el riego y cisternas de sanitarios (2).

| Transporte del agua hasta el depósito de almacenamiento desde los caminos de acceso (3).

| Transporte del purín hasta los depósitos o las balsas de almacenamiento impermeabilizadas (4).

| Zona de tratamiento y gestión de purines mediante vertido controlado con camión o tractor con cisterna o remolque: (5a) Depuración o biodigestión; (5b) Tratamiento terciario posterior con biorremediación u otros;

(5c) Almacenamiento del abono orgánico generado para su utilización como enmienda orgánica y (5d) Almacenamiento de los efluentes para su uso en la limpieza y el riego.

| Zona de forraje (maíz o alfalfa). Medidas de infiltración y retención del agua como bermas, caballones... (6).

| Zona de esparcimiento. Medidas de aprovechamiento e infiltración del agua, como bermas, caballones, surcos y boqueras (7).

| Balsa de almacenamiento del agua desde el terreno (8).

| Zona de abrevado. Incluir mejoras para la disminución del consumo (9).

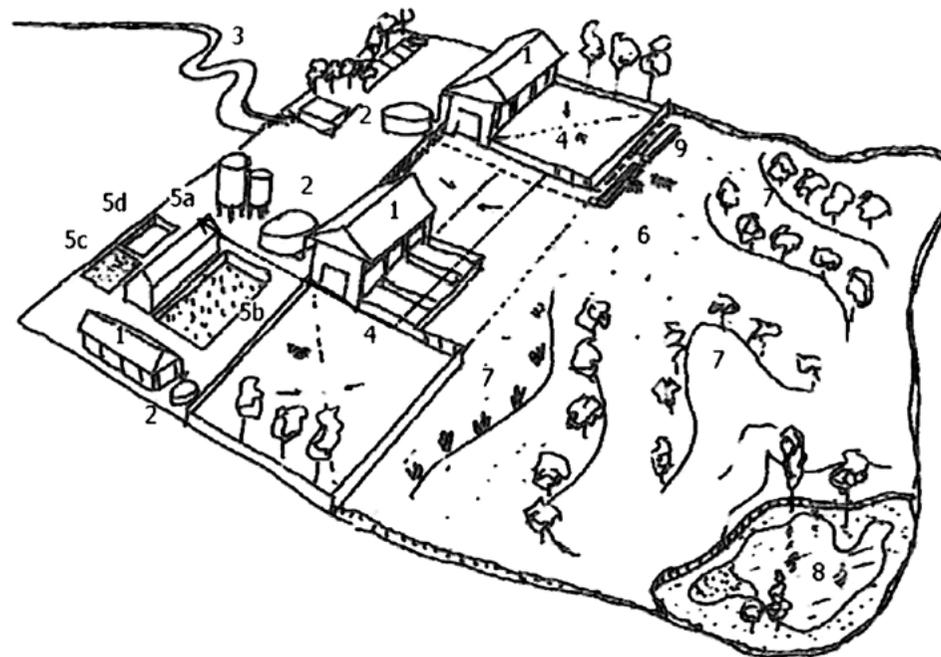


Figura 280. Esquema de explotación ganadera.

Instalaciones deportivas

10.8. Tipología

Las instalaciones deportivas son dotaciones presentes en la mayoría de las poblaciones. Su programa es variado, dependiendo del número de habitantes, la tradición deportiva y las condiciones meteorológicas del lugar.

Sin embargo, en pocas ocasiones se contemplan estrategias para el aprovechamiento del agua de la lluvia o la minimización de los consumos. El acabado superficial del pavimento, la climatología o el número de usuarios determinarán los criterios de diseño para estas grandes superficies deportivas.

Una instalación tipo dispone habitualmente de espacios deportivos al aire libre como el campo de fútbol, la cancha de tenis, la cancha de baloncesto, la pista de atletismo y de zonas urbanizadas en el entorno.

En las zonas deportivas exteriores las posibilidades de acabados son múltiples y destacan:



Figura 281. Instalación deportiva inundada.

| Tipo de acabado de superficie en instalaciones deportivas | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------|---------|---------|
| Instalación | Acabado y coeficiente de pérdida en aprovechamiento de agua | | | | | |
| Campo de fútbol | Césped natural | Césped artificial | Arena compactada | Tierra | Zahorra | Asfalto |
| | 0,5 | 0,1 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 0,1 |
| Cancha de baloncesto | Poliuretano | Asfalto | Slurry | | | |
| | 0 | 0,1 | 0,1 | | | |
| Pista de tenis | Césped natural | Césped artificial | Tierra batida | Hormigón | Asfalto | Slurry |
| | 0,4 | 0,1 | 0,5 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Pista de atletismo | Poliuretano | Asfalto | Arena | Hierba | Caucho | Ceniza |
| | 0,1 | 0,1 | 0,6 | 0,5 | 0,1 | 0,3 |
| Cubierta de polideportivo | Metálica | Lámina autoprottegida | Teja | Vegetal | | |
| | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,4 | | |
| Entorno urbanizado | Zona verde | Pavimento poroso | Pavimento impermeable | | | |
| | 0,5 | 0,3 | 0,1 | | | |



Figura 282. Pistas deportivas.

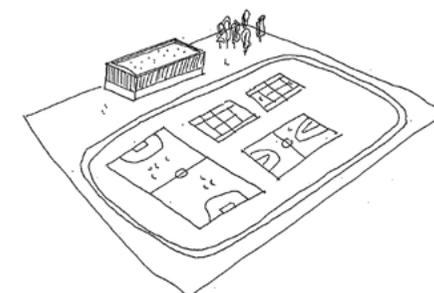


Figura 283. Esquema de instalación deportiva tipo.

| Superficie necesaria en instalaciones deportivas exteriores | | |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------|
| Tipo de instalación | Superficie (m ²) | |
| Polideportivo | 2.800 | Pista multifuncional con accesos y vestuarios |
| Campo de fútbol | 800 | 105 × 60 m |
| Cancha de baloncesto | 420 | 28 × 15 m |
| Pista de tenis | 264 | 24 × 11 m |
| Pista de atletismo | 3.900 | 400 m de recorrido |
| Entorno urbanizado | 500 | Zona transitable |
| | 1.000 | Zona verde |



Figura 284. Distintos tipos de acabados superficiales en instalaciones deportivas.

10.9. Recomendaciones de diseño

Las instalaciones deportivas son generalmente grandes consumidoras de agua: en los vestuarios y los aseos de los edificios polideportivos; en el riego diario de los campos de césped natural y artificial; en la limpieza de las superficies continuas a las pistas deportivas, generalmente mediante baldeo. La necesidad de agua para cada tarea es:

El riego. Se recomienda hacer con sistemas móviles, aspersores o subirrigación. La estimación del riego de una zona verde es de 250 l/(m² × año).

La limpieza y el baldeo. Las labores de mantenimiento de las instalaciones deportivas y de las zonas urbanizadas necesitan aproximadamente 1.000 l/(persona × año) en edificios polideportivos y de 50 l/(persona × año) en la limpieza.

El saneamiento. Es el agua que se emplea en los vestuarios y los aseos anexos donde

es recomendable instalar sistemas de recuperación del agua pluvial para las cisternas.

Además, se deben considerar algunos problemas específicos, como son:

Problemática específica de instalaciones deportivas

Cubierta de polideportivo

Agua pluvial no recuperada con rápida evacuación y sin almacenamiento posterior.

Campo de fútbol

Ausencia de recogida de agua de lluvia y necesidad elevada de riego.

Cancha de baloncesto

Exceso de impermeabilización y drenaje perimetral sin almacenamiento.

Pista de tenis

Drenaje sin almacenamiento y necesidad de riego.

Pista de atletismo

Drenaje sin almacenamiento.

Entorno urbanizado

Agua pluvial no aprovechada, uso de vegetación no autóctona y sin almacenamiento en las instalaciones. Elevada necesidad de riego.

Las siguientes variantes de acabado superficial para cada tipología deportiva incluyen los valores aproximados del aprovechamiento del agua (m³) según la precipitación media anual, la superficie y un coeficiente de aprovechamiento de pérdida estimado:

Dado la que las necesidades hídricas son elevadas, se recomienda la reutilización de agua de lluvia en cubierta a través de un canalón registrable con sistema de filtrado, una bajante con sistema de filtrado, una arqueta filtrante, un depósito de almacenamiento, un depósito

Almacenamiento de agua de lluvia conforme a la zona climática y al acabado superficial

| | Zona A | Zona B | Zona C |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Cubierta de polideportivo | Vegetal 1.595,53 m ³ | Metálica 1.132,94 m ³ | Metálica 995,53 m ³ |
| Campo de fútbol | Césped natural 455,87 m ³ | Césped artificial 323,70 m ³ | Tierra 126,42 m ³ |
| Cancha de baloncesto | Poliuretano 358,99 m ³ | Poliuretano 169,94 m ³ | Poliuretano 149,33 m ³ |
| Pista de tenis | Tierra batida/césped artificial 225,65 m ³ | Tierra batida/césped artificial 106,82 m ³ | Tierra batida/césped artificial 93,86 m ³ |
| Pista de atletismo | Poliuretano 3.333,52 m ³ | Poliuretano 1.578,03 m ³ | Poliuretano 1.386,63 m ³ |
| Entorno urbanizado | Zona verde 427,37 m ³ Pavimento permeable 569,83 m ³ | Zona verde 202,31 m ³ Pavimento permeable 269,75 m ³ | Zona verde 177,77 m ³ Pavimento permeable 273,03 m ³ |

Estimación necesidades hídricas anuales

| Elemento | Volumen anual | Cantidad | Total m ³ al año |
|-------------------------------------|----------------------------|----------------------|-----------------------------|
| WC (24 l p/día) | 8.800 l persona / año | 30 personas | 264 |
| Ducha (120 l p/día) | 43.800 l persona / año | 30 personas | 1.314 |
| Limpieza (2,7 l p/día) | 1.000 | 30 personas | 30 |
| Césped (1,2 l m ² / día) | 250 l m ² / año | 1.000 m ² | 250 |

de percolación, un equipo de control y una red de agua no potable diferenciada y señalizada.

Mediante la captación de la cubierta y su almacenamiento se puede dar respuesta a las necesidades básicas con agua pluvial. El depósito de almacenamiento deberá ser dimensionado

conforme a la superficie de captación, la precipitación media y la demanda.

Estas dimensiones dan una visión de la cantidad de agua que se utiliza en los recintos deportivos, así como de la oportunidad de ahorro potencial de que disponen.

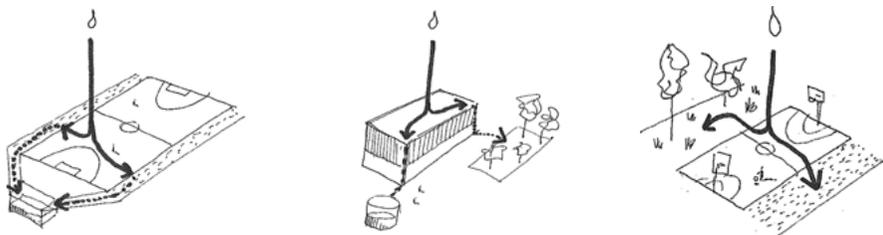


Figura 285. Esquemas de aprovechamiento en instalaciones deportivas.

| Captación de agua en cubierta de polideportivo (superficie x precipitación media anual) | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Necesidad estimada (544 m ³) | Zona A | Zona B | Zona C |
| WC: 264 m ³ | | | |
| Limpieza: 30 m ³ | 1.595,53 m ³ | 1.132,94 m ³ | 995,53 m ³ |
| Riego: 250 m ³ | | | |
| Depósito estimado | 87 m ³ | 69 m ³ | 63 m ³ |

| Recomendaciones generales | | |
|---------------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Deportivo cubierto | | Cubierta vegetal siempre que sea posible. Recuperación agua de cubierta para riego, cisternas y baldeo. |
| Deportivo exterior | Permeable | Infiltrar agua en terrenos aptos. Recuperar / almacenar agua para riego y baldeo. |
| | Impermeable | Recoger pluviales y almacenar para riego y baldeo. Derivar agua de escorrentía a zonas permeables. |

Recomendaciones específicas

| | |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cubierta de polideportivo | <p>Cubierta vegetal en zonas de alta pluviometría</p> <p>Recogida, filtrado y almacenamiento de agua pluvial en depósitos</p> <p>Recuperación del agua para cisternas de vestuarios, riego y limpieza</p> <p>Infiltración al terreno del agua excedente</p> |
| Campo de fútbol | <p>Recogida de agua de drenaje para el riego y la limpieza</p> <p>Sistema perimetral de drenaje conectado con almacenamiento</p> <p>Infiltración al terreno</p> |
| Cancha de baloncesto | <p>Almacenamiento de agua de escorrentía superficial para el baldeo y el riego de zonas verdes contiguas</p> <p>Infiltración al terreno permeable</p> |
| Pista de tenis | <p>Almacenamiento de agua para el riego de pistas de césped</p> <p>Almacenamiento de agua de drenaje para el baldeo y el riego de zonas contiguas</p> <p>Infiltración al terreno permeable</p> |
| Pista de atletismo | <p>Zanjas filtrantes perimetrales al recorrido de la pista</p> <p>Depósitos de almacenamiento para el riego de las instalaciones deportivas en el interior de la pista</p> <p>Inclusión de zonas verdes</p> <p>Infiltración al terreno permeable</p> |
| Entorno urbanizado | <p>Pavimentos porosos</p> <p>Minimizar la escorrentía superficial</p> <p>Incrementar las zonas verdes</p> <p>Utilizar especies vegetales autóctonas y de bajo consumo hídrico</p> <p>Infiltración al terreno permeable</p> |

10.10. Ejemplo representativo

Se considera una instalación tipo en terreno permeable y Zona climática C compuesta de las siguientes instalaciones:

| **El polideportivo.** Tiene una superficie de captación en cubierta de 2.800 m² con la cubierta de chapa, con sistema de recogida de

agua y con un depósito enterrado asociado de 60 m³ de agua para uso en cisternas, riego y limpieza.

| **El campo de fútbol.** Con 800 m² de superficie de tierra compactada sobre una cama de gravilla de 5 cm, con encachado de 40 cm y con una necesidad de riego baja. El drenaje del campo se realiza mediante una red en espina de pez de tubería dren perforada de 125 mm de diámetro y dren principal de 250 mm de diámetro conectado al drenaje perimetral.

El drenaje perimetral se realiza mediante zanjas filtrantes y el drenaje enterrado es perforado para transportar el agua recogida hasta un depósito enterrado. En las bandas laterales se dispone de vegetación autóctona de bajo consumo hídrico y con riego por goteo desde el depósito enterrado.

| **La cancha de baloncesto.** Compuesta por una superficie impermeable de poliuretano de 420 m² y con una necesidad de limpieza de 2 veces por semana. La escorrentía superficial se deriva a zanjas de drenaje para la infiltración y el transporte del agua hasta un depósito enterrado mediante un tubo dren perforado. Además dispone de bandas vegetales de separación con especies vegetales de bajo consumo hídrico.

| **La pista de tenis.** Formada por dos pistas de tierra batida de 264 m², cada una sobre una base permeable de zahorra compactada. El drenaje de la escorrentía superficial es pe-

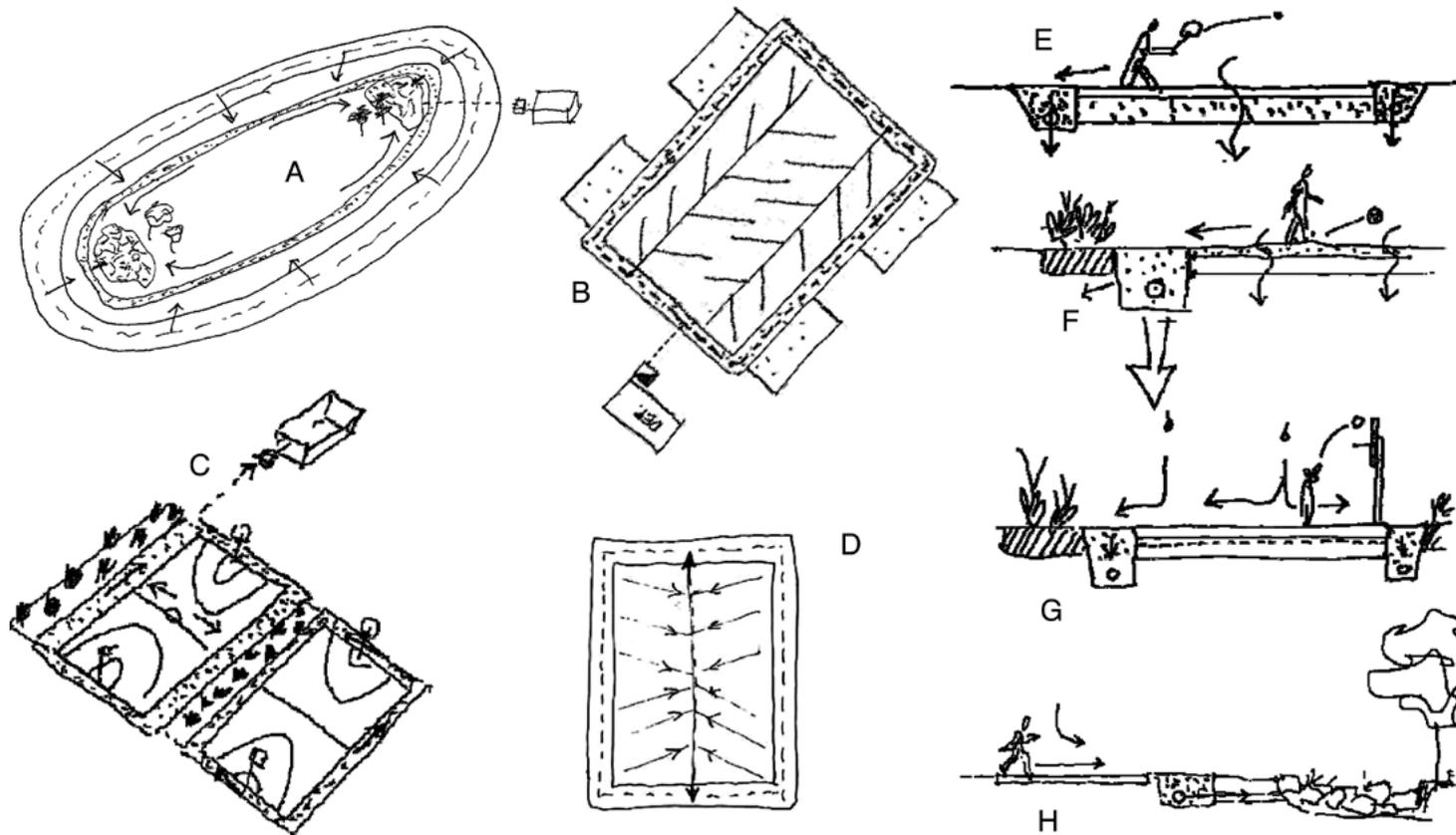


Figura 286. Ejemplos de aprovechamiento del agua en instalaciones deportivas: (A) Pista de atletismo. (B) Drenaje de campo de fútbol. (C) Cancha de baloncesto. (D) Drenaje de pista de tenis. (F) Sección de campo de fútbol. (G) Sección de cancha de baloncesto. (H) Sección de pista de atletismo.

rimetral y permite la infiltración del agua al terreno, recogiendo el exceso en un depósito para el riego y la limpieza. La necesidad de riego y mantenimiento es alta.

La pista de atletismo. Pista circular de 400 metros lineales y una superficie de 3.900 m². La superficie es impermeable de caucho y el drenaje es perimetral con infiltración y transporte hasta balsas superficiales de almacenamiento e infiltración que cuentan con rebose hasta depósito de almacenamiento.

La urbanización. Con pavimentos permeables, discontinuos y con junta abierta que permiten la infiltración directa de agua al terreno. Se recomienda la incorporación de zonas verdes con especies vegetales autóctonas de bajo consumo y el uso de riego por goteo desde depósito.

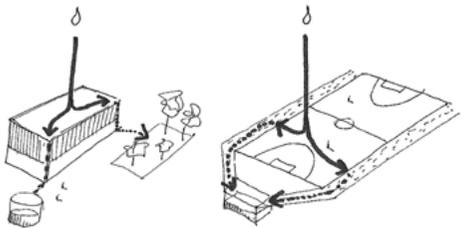
Esta es la estimación del coste orientativo para las diferentes soluciones:

| | | Instalaciones deportivas | | | |
|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------|------------------|
| | | m ² | Precio unitario (€/m ²) | Coste estimado (€) | |
| Campo de fútbol (800 m²) | Tierra compactada sobre cama de gravilla (5 cm) y encachado (40 cm) | 800 | 40 | 32.000 | 127.400 € |
| | Sistema de drenaje e infiltración con tubos de drenaje en espina de pez con 125 mm de diámetro | 560 | 25 | 14.000 | |
| | Sistema de drenaje e infiltración con tubos de drenaje principales en espina de pez con 250 mm de diámetro | 210 | 40 | 8.400 | |
| | Zanjas perimetrales de infiltración con capa de grava, lámina geotextil y tubos de drenaje de 250 mm de diámetro | 350 | 70 | 24.500 | |
| | Conexión hasta el depósito de almacenamiento | 25 | 40 | 1.000 | |
| | Arqueta de registro | 1 | 1.500 | 1.500 | |
| Cancha de baloncesto (420 m²) | Superficie impermeable de poliuretano sobre aglomerado asfáltico | 800 | 30 | 24.000 | 47.800 € |
| | Zanjas perimetrales de infiltración con capa de grava, lámina geotextil y tubos de drenaje con 250 mm de diámetro | 90 | 70 | 6.300 | |
| | Conexión hasta el depósito de almacenamiento | 25 | 40 | 1.000 | |
| | Arqueta de registro | 1 | 1.500 | 1.500 | |
| | Bandas laterales vegetadas 1ud x 30 x 5 m | 150 | 100 | 15.000 | |
| Pista de tenis 260 m² | Superficie de tierra batida sobre cama de tierra y gravilla con lámina geotextil | 265 | 40 | 10.600 | 20.100 € |
| | Sistema de drenaje e infiltración de tubos de drenaje en espina de pez con 125 mm de diámetro | 100 | 25 | 2.500 | |
| | Zanjas perimetrales de infiltración: capa de grava, lámina de geotextil y tubos de drenaje de 125 mm de diámetro | 75 | 60 | 4.500 | |
| | Conexión hasta depósito de almacenamiento | 25 | 40 | 1.000 | |
| | Arqueta de registro | 1 | 1.500 | 1.500 | |
| Pista de atletismo (3.900 m² y 400 m de recorrido) | Superficie de caucho sobre cama de tierra y gravilla con lámina geotextil | 2.400 | 50 | 120.000 | 150.900 € |
| | Zanjas perimetrales de infiltración y transporte con capa de grava, lámina geotextil y tubos de drenaje de 250 mm de diámetro | 365 | 60 | 21.900 | |
| | Conexión hasta el depósito de almacenamiento | 50 | 40 | 2.000 | |
| | Balsas de infiltración y de almacenamiento | 2 | 2.000 | 4.000 | |
| | Arqueta de registro | 2 | 1.500 | 3.000 | |

10.11. Ficha comparativa

Zona deportiva compuesta por un polideportivo de 2.500 m² de superficie, un campo de fútbol de 8.000 m², una zona verde de 2.000 m²,

una zona peatonal de 3.000 m² en Zona climática A con 950 mm precipitación anual.

| | Características de la instalación | Gestión y aprovechamiento del agua | Impacto ambiental |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>INSTALACIÓN ESTÁNDAR</p>  | <ul style="list-style-type: none"> – Polideportivo con vertido de pluviales a la red. – Campo de fútbol de césped con riego de 400 l/(m² × año) y sin almacenamiento. – Zona verde con necesidad de riego de 400 l/m²/semana. – Zona urbana de asfalto impermeable. | <ul style="list-style-type: none"> – Riego fútbol: 3.200.000 l/año (1.824€ /año)* – Riego de zona verde: 104.000 l/año (60 €/año)* – Aprovechamiento de agua = 0 litros. – Vertido a la red: campo de fútbol (coeficiente de escorrentía 0,5), polideportivo (0,9), entorno urbanizado (0,8) y zona verde (0,5) = 4.342.000 l/año (gasto depuración del vertido = 2.301 € /año)* | <ul style="list-style-type: none"> – Elevado consumo de agua por riego. – Nula amortiguación del vertido a saneamiento. – Elevado coeficiente de escorrentía. – Notables variaciones de temperatura por el efecto “isla de calor”. |
| <p>CON APROVECHAMIENTO DE AGUA</p>  | <ul style="list-style-type: none"> – Polideportivo con almacenamiento pluvial. – Zona verde necesidad de riego de l/(m² × semana). – Zona urbana permeable (coeficiente 0,7). – Depósito con aguas del polideportivo y entorno 50.000 l (10.000 €). – Recuperación del agua en fútbol. – Depósito de agua procedente del campo de fútbol: 100.000 l (15.000 €). | <ul style="list-style-type: none"> – Ahorro por no depuración (8.882 m³) = 4.700 €* – Ahorro en riego del campo de fútbol = 1.824 €* – Zona verde riego = 60 €* <p>Ahorro estimado total anual: 6.584 €*</p> <p>Retorno del sobrecoste en la inversión: 4 años.</p> | <ul style="list-style-type: none"> – Recuperación y almacenamiento del agua. – Amortiguación del vertido a la red de saneamiento. – Mejora higrotérmica y ambiental del entorno. – Reducción del efecto “isla de calor”. – Disminución del mantenimiento y mejora ambiental del entorno. |

* Importe saneamiento y abastecimiento conforme a tarifas del agua (AEAS).

