

Diseño de pavimentos permeables en España: situación actual y necesidades futuras

Design of permeable pavements in Spain: current situation and future needs

Eduardo García-Haba ^{ORCID}^{a1*}, Jorge Rodríguez-Hernández ^{ORCID}^b, Ignacio Andrés-Doménech ^{ORCID}^{a2}, Carmen Hernández-Crespo ^{ORCID}^{a3}, Jose Anta ^{ORCID}^c y Miguel Martín ^{ORCID}^{a4}

^a Instituto Universitario de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente - Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022 València, España.

^b Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción – Universidad de Cantabria, Avda. de los Castros 44, 39005 Santander, España.

^c Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil - CITEEC, Universidade da Coruña, Campus de Elviña s/n, 15002, A Coruña, España.

E-mail: ^{a1}edgarha@iiama.upv.es, ^brodrighj@unican.es, ^{a2}igando@hma.upv.es, ^{a3}carhercr@upv.es, ^cjose.anta@udc.es, ^{a4}mmartin@hma.upv.es

*Autor para correspondencia

Recibido: 07/09/2022

Aceptado: 13/10/2022

Publicado: 31/10/2022

Citar como: García-Haba, E., Rodríguez-Hernández, J., Andrés-Doménech, I., Hernández-Crespo, C., Anta, J., Martín, M. 2022. Design of permeable pavements in Spain: current situation and future needs. *Ingeniería del agua*, 26(4), 279-296. <https://doi.org/10.4995/la.2022.18290>

RESUMEN

Los sistemas de pavimento permeable son una de las técnicas de drenaje urbano sostenible mejor consideradas para la gestión sostenible de las aguas pluviales. El presente trabajo tiene como objetivos destacar y analizar las referencias internacionales y nacionales más importantes para el diseño de sistemas de pavimento permeable, llevándose a cabo una exhaustiva revisión del estado del arte de los criterios de diseño hidrológico e hidráulico, ambiental y estructural de estas estructuras, así como de las recomendaciones para su operación y mantenimiento, propuestos en las guías españolas. Innovaciones recientes desarrolladas en España, reflejan que el ajuste y la mejora del diseño de los sistemas de pavimento permeable puede ayudar a optimizar su funcionamiento. Por ejemplo, la consideración de volúmenes de gestión de lluvia adaptados a las condiciones climatológicas del lugar de instalación, la incorporación de materiales reactivos para el control de contaminantes, la elección de superficies permeables más apropiadas o la ejecución de un proceso de mantenimiento mejorado. El conocimiento generado por la investigación, apoyado con información gráfica adaptada a la normativa municipal, debe promover el desarrollo de manuales y guías de diseño, exclusivas de sistemas de pavimento permeable, adaptadas a las singularidades de cada municipio.

Palabras claves: sistemas urbanos de drenaje sostenible, pavimentos permeables, criterios de diseño, limpieza y mantenimiento, colmatación.

ABSTRACT

Permeable pavement systems are one of the most highly regarded sustainable urban drainage techniques for sustainable stormwater management. This work aims to highlight and analyse the most relevant international and national references in permeable pavement systems design. An exhaustive review of the state of the art of the hydrological and hydraulic, environmental and structural design criteria of permeable pavements, together with operation and maintenance tasks proposed in Spanish guidance was developed. Recent innovations developed in Spain show that an improvement in design can optimise its operation functions. For example, the consideration of the management rainfall volume adapted to climate conditions of the installation site, the addition of reactive materials for pollutant control, the employment of appropriate permeable surfaces or an improved operation and maintenance process. Knowledge generated by research studies, complemented with graphic information adapted to municipal regulations, should promote the development of manuals and design guides, exclusive to permeable pavement systems, adapted to cities particularities.

Keys word: sustainable urban drainage systems, permeable pavements, design criteria, operation and maintenance, clogging.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las ciudades genera importantes cambios en su cobertura superficial, interrumpiendo drásticamente el ciclo hidrológico natural. Particularmente, la impermeabilización del suelo y la reducción de superficie vegetal, limitan la capacidad de interceptar, almacenar e infiltrar en el subsuelo el agua de lluvia. En consecuencia, la producción de escorrentía durante eventos de precipitación se magnifica, provocando serios problemas de inundaciones, medioambientales y sociales (Woods-Ballard *et al.*, 2015; Giménez-Maranges *et al.*, 2020). La implementación de superficies permeables, entendidas como soluciones basadas en la naturaleza (SbN), se plantea como una firme estrategia para mitigar los impactos de estos problemas (Zölch *et al.*, 2017). Por ejemplo, la adopción de infraestructuras verdes-azules o de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), como parques y jardines inundables, cubiertas vegetadas, alcorques estructurales, o pavimentos permeables, contribuyen a la resiliencia del ecosistema urbano, a través del mantenimiento o restauración de las funciones hidrológicas naturales (Oral *et al.*, 2020). Según la literatura, los pavimentos permeables, además de pertenecer a los conjuntos de sistemas y soluciones citados anteriormente, son también considerados como pavimentos biomiméticos o *cool pavements* en el ámbito anglosajón (Araque *et al.*, 2021; Kappou *et al.*, 2022), que basan su comportamiento en la propia naturaleza para hacer frente al fenómeno isla de calor, ayudando a disminuir el aumento de temperaturas en las zonas urbanas más densas y consolidadas).

El presente artículo se centra en los pavimentos permeables, conceptualizados como sistema integral de gestión de agua de lluvia, citando y analizando las principales referencias internacionales y españolas para el diseño de estas estructuras. Asimismo, discute las principales y más recientes innovaciones llevadas a cabo en España en el ámbito de esta técnica, cuyos resultados demuestran su elevada eficiencia a la hora de controlar y gestionar las escorrentías pluviales. Las guías y recomendaciones sobre SUDS que se pueden consultar actualmente en España, ofrecen información de partida suficiente para el diseño de los sistemas de pavimento permeable. Sin embargo, cuentan con el principal inconveniente de que los criterios de diseño se plantean para un ámbito de aplicación general, eludiendo las particularidades que cada municipio pueda contemplar en sus ordenanzas urbanísticas, cuando éstas existen y son lo suficientemente detalladas. La abundante información disponible debe servir de respaldo para el uso de los pavimentos permeables, además de fomentar que las administraciones públicas tomen decisiones e iniciativas como el desarrollo de instrucciones o guías de diseño y de aplicación, especialmente a nivel local.

Sistemas de pavimento permeable

Los sistemas de pavimento permeable están considerados como una herramienta eficaz para la gestión de las escorrentías urbanas en origen, interceptándolas, retrasando su cinética, y reduciéndolas en términos volumétricos, además de tratarlas desde el punto de vista de la calidad del agua (Pratt *et al.*, 1989; Scholz y Grabowiecki, 2007; Drake *et al.*, 2013). Concretamente, los procesos de tratamiento que se dan lugar en los sistemas de pavimento permeable son la filtración, adsorción, biodegradación y sedimentación, permitiendo la retención de sedimentos, algunos nutrientes, metales pesados, aceites y grasas (Beecham *et al.*, 2015; Sambito *et al.*, 2021).

Estas estructuras permiten la percolación del agua de lluvia a su través, al mismo tiempo que ofrecen el soporte apropiado para la circulación peatonal y de vehículos. El agua se retiene temporalmente bajo la superficie para posteriormente ser utilizada, infiltrada en el suelo o descargada aguas abajo hacia la red de drenaje o el medio natural de forma laminada. En general, la sección tipo de los sistemas de pavimento permeable está compuesta por un conjunto de capas superpuestas entre sí y apoyadas sobre la explanada natural o artificial (Figura 1). De arriba hacia abajo, las capas generalmente consisten en: pavimento permeable (formado por la propia superficie permeable y base), subbase y explanada. Adicionalmente, suelen ir complementadas con tuberías de drenaje y/o geosintéticos: geotextiles con funciones de filtro, protección, y separación entre capas; o geomembranas, con función de impermeabilización (Pratt *et al.*, 2002; Sañudo-Fontaneda, 2014; Woods-Ballard *et al.*, 2015).

En la capa superficial pueden emplearse pavimentos permeables de césped reforzado, pavimentos porosos, o pavimentos impermeables con junta permeable, formados por adoquines y/o bloques. Por su parte, la base se ejecuta normalmente con material granular sin finos, mientras que la subbase se resuelve de nuevo con gravas o zahorras con bajo porcentaje de partículas finas, o mediante la instalación de cajas de plástico de alta resistencia e importante capacidad de almacenamiento de agua (Rodríguez-Hernández, 2008; Sañudo-Fontaneda, 2014; Jato-Espino *et al.*, 2019; Castillo-Rodríguez *et al.*, 2021).

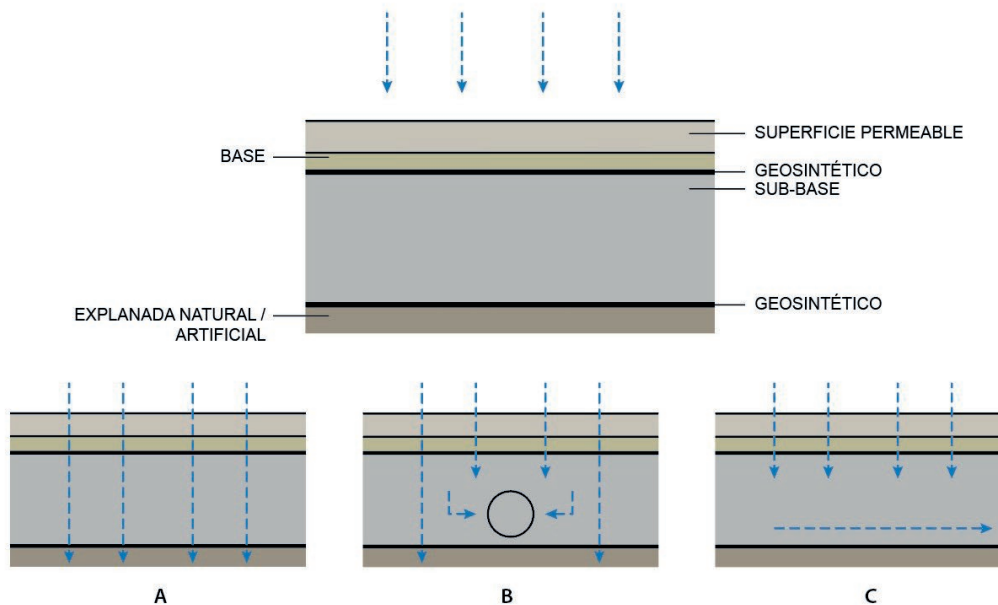


Figura 1 | Secciones tipo de sistema de pavimento permeable y posibles destinos del agua captada: A) El agua de escorrentía se infiltra en el terreno; B) Parte de la escorrentía se infiltra al terreno y parte se evacúa mediante un tubo drenante; C) La escorrentía se transporta a otro lugar para su tratamiento, almacenamiento o infiltración (elaboración propia).

REFERENCIAS INTERNACIONALES PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE PAVIMENTO PERMEABLE

Sin duda, uno de los manuales más destacados y consultados en el ámbito de los SUDS a nivel internacional, es *The SUDS Manual*, elaborado por la *Construction Industry Research and Information Association* (CIRIA), de Reino Unido (Woods-Ballard *et al.*, 2015). Este extenso y completo documento, está basado tanto en diferentes estudios llevados a cabo en todo el mundo, como en la experiencia de sus autores. La guía cubre varios aspectos como la planificación, diseño, construcción y mantenimiento de SUDS y, en consecuencia, de los sistemas de pavimento permeable. El manual contiene diferentes puntos dedicados a criterios de diseño de carácter general y específico (consideraciones hidráulicas, de calidad del agua, servicios para el ciudadano, biodiversidad, estructurales y paisajísticas), así como a los elementos de entrada y salida, y a las características de los materiales a emplear.

Resulta relativamente fácil encontrar guías y manuales de diseño de SUDS en la literatura técnica. Sin embargo, esto es más complicado cuando se requiere una guía focalizada en los sistemas de pavimento permeable. En este caso, sobresale la publicación específica elaborada por CIRIA (Pratt *et al.*, 2002) y, como ejemplo de regulación local, la guía de pavimentos permeables de la ciudad de Rockville (Maryland) en Estados Unidos (City of Rockville, 2018). Esta última se centra en el uso de superficies de adoquín de hormigón con junta permeable en calles residenciales, y abarca consideraciones de óptima localización, diseño hidráulico, integración paisajística, materiales a emplear, construcción y mantenimiento. Adicionalmente, esta información está complementada con un conjunto de esquemas que incluyen secciones tipo recomendadas por la administración local.

REFERENCIAS ESPAÑOLAS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE PAVIMENTO PERMEABLE

En 2008, el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) publicó el manual *Gestión de las aguas pluviales. Implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano* (Puertas *et al.*, 2008). El documento constituyó el primer intento por parte del entonces Ministerio de Fomento en la integración de las técnicas de drenaje urbano sostenible en

la gestión urbana de las aguas pluviales. En él se recopila un amplio contenido de consideraciones para el diseño de pavimentos permeables, entre otras técnicas, basadas en referencias internacionales contrastadas. Fue en 2016 cuando la legislación española incorporó por primera vez el término SUDS en el Real Decreto 638/2016, estableciendo que los sistemas urbanos de drenaje sostenible, como las superficies permeables, deben ser incorporados en nuevas áreas industriales y futuros desarrollos urbanísticos (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2016). En el periodo 2005-2019, y tomando como base este marco legislativo nacional, varias comunidades autónomas establecieron las bases para la implantación y promoción de SUDS en sus planes de ordenación territorial. En el caso de Euskadi, se elaboraron el manual para la redacción de planeamiento urbanístico con criterios de sostenibilidad y la guía para el desarrollo sostenible de los proyectos de urbanización, promoviendo la incorporación de SUDS como herramienta clave para una mejor gestión del drenaje urbano, y favoreciendo la infiltración de las aguas de lluvia superficiales (Sociedad Pública de Gestión Ambiental Gobierno Vasco, s.f.; Grupo Sprilur, s.f.). En Galicia, se establecen criterios para la integración de SUDS en las Instrucciones Técnicas para Obras Hidráulicas, incorporando adicionalmente detalles técnicos (Xunta de Galicia, s.f.). En Catalunya se publicó la guía para el aprovechamiento de agua de lluvia (Molist *et al.*, 2011). La Comunitat Valenciana promueve la implementación de SUDS tanto en la Ley de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Paisaje (Diari Oficial de la Comunitat Valenciana, a) como en el Plan de Acción Territorial Sobre Prevención del Riesgo de Inundación en la Comunitat Valenciana (Diari Oficial de la Comunitat Valenciana, b). Por su parte, Canarias establece que los SUDS son de obligada implementación en nuevos desarrollos urbanos, tal y como viene recogido en el Plan Hidrológico Insular de El Hierro (Boletín Oficial de Canarias, s.f.). La Región de Murcia, en su modificación de Ley de Ordenación Territorial y Urbanística de la Región de Murcia (Boletín Oficial de la Región de Murcia, a) y en el Decreto Ley de Protección Integral del Mar Menor (Boletín Oficial de la Región de Murcia, b) alude a los SUDS como técnicas de renaturalización y mitigación de los efectos del cambio climático, así como de control de escorrentías pluviales ante su vertido al medio marino. Finalmente, la Comunidad de Madrid incluye en las Normas para Redes de Saneamiento, un conjunto de recomendaciones técnicas para la implementación de SUDS (Canal de Isabel II, s.f.).

A pesar de la compleja organización territorial del país y las diferentes percepciones del modo de gestión de las aguas pluviales mediante SUDS (Andrés-Doménech *et al.*, 2021), desde el año 2018, ciudades como Madrid (Ayuntamiento de Madrid, 2018), Barcelona (Ajuntament de Barcelona, 2020), València (De la Fuente *et al.*, 2021) o Castelló de la Plana (Perales-Momparler *et al.*, 2019), han elaborado guías y manuales locales que proporcionan una amplia visión de las técnicas SUDS, abordando los criterios de diseño, la fase de ejecución y el modo de explotación y mantenimiento. Complementariamente, en 2019, el Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO) elaboró una guía descriptiva y orientativa de las técnicas SUDS a adoptar para mejorar la gestión de las aguas pluviales en las ciudades (MITECO, 2019). En el ámbito de los sistemas de pavimento permeable, la totalidad de estas guías describen y analizan esta técnica, además de proponer recomendaciones y criterios para su adecuado diseño.

Innovaciones recientes para la mejora del rendimiento de los sistemas de pavimento permeable

Según Jato-Espino *et al.* (2019), el origen de las investigaciones sobre pavimentos permeables en España se produce a mediados de la década de los años 90, obteniendo resultados que señalaban a estas estructuras como potenciales herramientas para el control de la cantidad y la calidad de la escorrentía urbana. Sin embargo, es a partir del año 2003 cuando comienzan a desarrollarse numerosos proyectos de investigación, centrados en los pavimentos permeable. El proyecto *FIDICA* (2003), liderado por el Grupo de Investigación GITECO de la Universidad de Cantabria (UC), estudió distintas secciones permeables de firmes biodegradantes de hidrocarburos, utilizando áridos reciclados (Castro-Fresno *et al.*, 2005; Rodríguez-Hernández, 2008; Rodríguez-Bayón, 2008). En 2010, de nuevo GITECO-UC lideró el proyecto *VEA*, que tenía como objetivos analizar la capacidad de captación de agua de lluvia de los firmes permeables, además de desarrollar sistemas de almacenamiento para uso no potable o geotérmico (Andrés-Valeri *et al.*, 2014; Sañudo-Fontaneda *et al.*, 2014a; Sañudo-Fontaneda *et al.*, 2014b). El proyecto *RHIVU* (2013), también liderado por GITECO-UC, analizó entre otros objetivos, el comportamiento mecánico e hidrológico de diferentes pavimentos permeables urbanos. Se estudió la influencia de los hidrocarburos asociados al tráfico de vehículos en la resistencia a la abrasión de diferentes mezclas asfálticas porosas (Jato-Espino *et al.*, 2016; Rodríguez-Hernández *et al.*, 2015; Rodríguez-Bayón *et al.*, 2005). Otro caso de estudio es el proyecto *SUPRIS* (2016), coliderado por GITECO-UC y el Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la Universitat Politècnica de València (UPV), que estudió experimentalmente el comportamiento de diferentes pavimentos permeables bajo condiciones de cambio climático, desde los puntos de vista de la cantidad y la calidad

(Elizondo-Martínez *et al.*, 2019; Hernández-Crespo *et al.*, 2019; Fernández-Gonzalvo *et al.*, 2021). En 2017, el proyecto *CerSUDS*, liderado por el Instituto de Tecnología Cerámica de Castelló de la Plana (ITC), se centró en el diseño de una superficie de pavimento permeable de bajo impacto ambiental, construido a partir de baldosas cerámicas con escaso valor comercial (Figura 2). Los resultados demostraron la idoneidad de este material desde los puntos de vista estructural, hidráulico, ambiental y de la seguridad (Castillo-Rodríguez *et al.*, 2021; Life CerSUDS, s.f.).



Figura 2 | Detalle de la instalación sobre base de gravilla del adoquín cerámico CerSUDS (izquierda) y aspecto de superficie acabada junto a zona ajardinada (derecha). (Elaboración propia).

Más recientemente, se han finalizado los proyectos *SAFERUP!* (2018) y *HOFIDRAIN* (2018), liderados por GITECO-UC y IIAMA-UPV respectivamente. El primero se centra en el diseño de pavimentos urbanos con múltiples objetivos, incluido el que funcionen de forma resiliente a las inundaciones, manteniendo su resistencia frente a cargas de tráfico. Paralelamente, otro de los objetivos del proyecto ha permitido el desarrollo inicial de una herramienta de localización y selección de pavimentos permeables de asfalto poroso en el entramado urbano (Gupta *et al.*, 2021a; Gupta *et al.*, 2021b; Gupta, 2022). Por su parte, el proyecto *HOFIDRAIN*, en el que participaron el IIAMA-UPV, GITECO-UC y el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente de la Universidade da Coruña (GEAMA-UDC), abarcó la caracterización hidráulica, ambiental y mecánica de secciones filtrantes en diferentes escenarios: considerando la colmatación del pavimento, la incorporación de materiales reactivos para potenciar la capacidad de tratamiento del sistema de pavimento permeable, o el empleo de diferentes aditivos para mejorar su vida útil y resiliencia. Se encontró que la adición de fango procedente de estación de tratamiento de agua potable (ETAP) en capas granulares del sistema, ayuda a reducir la presencia de fósforo total (33%) y fosfatos (55%) en el agua de escorrentía infiltrada. Además, se evaluó y se constató la idoneidad de utilizar pavimentos permeables como sistemas de almacenamiento de agua de lluvia para reutilización en el medio urbano, reafirmandolos además como una potente herramienta para la eliminación completa de *E. coli* (García-Haba *et al.*, 2021a; Goya *et al.*, 2022).

CRITERIOS DE DISEÑO

Las guías y manuales analizados incluyen una gran variedad de requerimientos técnicos con el fin de caracterizar los sistemas de pavimento permeable. Analizando los criterios de diseño que recogen las referencias españolas, éstos pueden catalogarse como hidrológicos e hidráulicos, ambientales y estructurales. A continuación, se recogen y discuten los principales a juicio de los autores.

Criterios hidrológicos e hidráulicos

En este apartado se recopilan los aspectos de diseño exclusivos de los sistemas de pavimento permeable, desde el punto de vista hidrológico e hidráulico, propuestos en las guías y manuales nacionales. Es necesario recalcar que tras el diseño de la

estructura de pavimento permeable, deberá tenerse en cuenta su integración en el sistema general de drenaje, realizando una evaluación completa del conjunto. Para ello, se considerarán aspectos como las solicitaciones de lluvia de diseño, para que satisfagan las restricciones o limitaciones de descarga de caudales impuestas en el lugar de aplicación, siendo recomendable el empleo de modelos, software o herramientas informáticas de cálculo hidrológico e hidráulico.

Volumen de gestión

Los sistemas de pavimento permeable se diseñan con el objetivo de retener temporalmente y evacuar o infiltrar la escorrentía generada en la cuenca por un cierto volumen de precipitación. Este volumen de lluvia a gestionar viene definido habitualmente en las guías como el volumen del episodio de lluvia que no es superado, al menos, por el 80% de los eventos de precipitación (V_{80} o percentil 80% de la serie de episodios de precipitación). Mediante la gestión de este volumen de lluvia se logra el tratamiento de las primeras aguas de todos los eventos y de sus contaminantes asociados. En este sentido, la ciudad de València establece en su guía un amplio rango de volúmenes de gestión (desde V_{60} hasta V_{95}) según la tipología urbana, fundamentado en la oportunidad y flexibilidad de los espacios disponibles para la ubicación de los SUDS (De la Fuente *et al.*, 2021). Así, se es más exigente en la implantación de SUDS en grandes áreas ajardinadas (V_{95}) que en zonas consolidadas de centro histórico (V_{60}) donde la realidad hace que la instalación de SUDS deba hacerse con criterios hidrológicos menos ambiciosos. El volumen efectivo de gestión viene determinado por la escorrentía superficial que se genera en la superficie impermeable que drena hacia la superficie de pavimento permeable, junto con la lluvia que precipita sobre la misma. A tal efecto, las guías recomiendan establecer una relación 2:1 para determinar la proporción entre área generadora de escorrentía (cuenca) y área de captación y tratamiento (pavimento permeable) (Woods-Ballard *et al.*, 2015; Ayuntamiento de Madrid, 2018; Perales-Momparler *et al.*, 2019; Ajuntament de Barcelona, 2020; De la Fuente *et al.*, 2021).

Permeabilidad

A la hora de tratar la permeabilidad, los manuales hacen referencia a dos capas en concreto: el pavimento y la explanada sobre la que apoya la estructura de firme. La permeabilidad del material que define al pavimento debe ser siempre superior a la intensidad de precipitación característica del lugar de aplicación. La guía de diseño de Barcelona sugiere una capacidad de percolación mínima del pavimento de 2000 mm/h (Ajuntament de Barcelona, 2020), mientras que las guías de Castelló de la Plana y València consideran un valor mínimo de 4500 mm/h (Perales-Momparler *et al.*, 2019 y De la Fuente *et al.*, 2021), afectado según éstas dos últimas referencias, por un factor reductor de seguridad (FS=10) para tener en cuenta la colmatación del pavimento a largo plazo. Respecto a la permeabilidad del suelo, siempre y cuando la infiltración de la escorrentía al subsuelo sea un objetivo, debe ser superior o igual 10^{-6} m/s (3.6 mm/h). En el caso de que el proceso de infiltración no sea viable, se recomienda evacuar la escorrentía almacenada en la subbase, mediante la instalación de una tubería de drenaje en su fondo (Ayuntamiento de Madrid, 2018; Perales-Momparler *et al.*, 2019; Ajuntament de Barcelona, 2020; De la Fuente *et al.*, 2021). Por su parte, MITECO (2019) propone que la sección tipo del sistema de pavimento permeable se determine según las condiciones climáticas y de permeabilidad del lugar de instalación.

Pendiente

Cuando se pretende la instalación de un sistema de pavimento permeable en una superficie con pendiente importante (>3%), se recomienda la ejecución de terrazas o barreras transversales al flujo (Woods-Ballard *et al.*, 2015; Ayuntamiento de Madrid, 2018; Perales-Momparler *et al.*, 2019; De la Fuente *et al.*, 2021). De esta manera se consigue maximizar el volumen de almacenamiento en la subbase y evitar problemas de erosión de la subbase debidos a una excesiva velocidad del flujo de agua bajo la superficie (Figura 3).

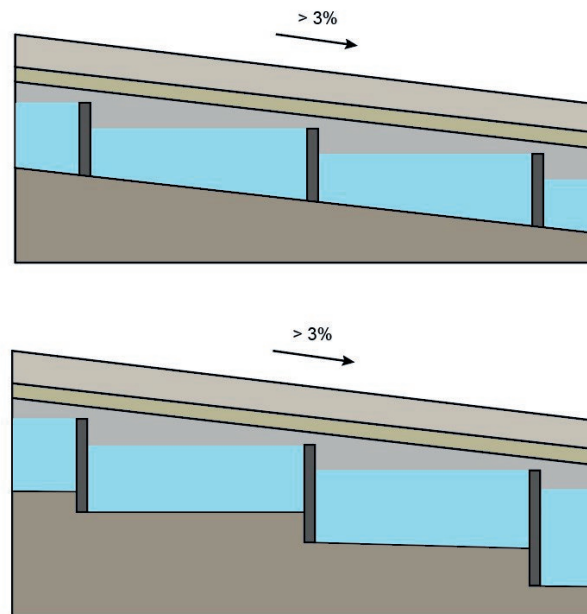


Figura 3 | Ejemplos de terrazas o barreras transversales en subbase de pavimento permeable (adaptado de Ayuntamiento de Madrid, 2018).

Como opción alternativa, se puede limitar la construcción de pavimentos permeables en pendiente, tal y como plantea la “Guia Tècnica per al Disseny de Sistemes de Drenatge Urbà sostenible SUDS” de Barcelona (Ajuntament de Barcelona, 2020), que reconoce la dificultad de ejecutar la solución anterior. Este documento recomienda el uso de pavimentos permeables únicamente cuando la superficie a drenar tenga una pendiente máxima del orden del 2-3% para evitar la necesidad de construir las terrazas necesarias que aseguren el correcto rendimiento del sistema.

Tiempo de vaciado

Con el fin de tener disponible el volumen de almacenamiento en previsión de eventos posteriores y por tanto, mantener la capacidad de gestión del sistema, se aconseja que el tiempo máximo para que se produzca el vaciado de la subbase sea, en general, de 48 horas (Ayuntamiento de Madrid, 2018; Perales-Momparler *et al.*, 2019; De la Fuente *et al.*, 2021). No obstante, este parámetro no se tendrá en cuenta cuando la función principal del sistema de pavimento permeable sea la de aljibe (Woods-Ballard *et al.*, 2015), debiendo contar en cualquier caso con un desagüe de emergencia que evite la inundación de la superficie.

Criterios ambientales

Se ha demostrado que existe una fuerte correlación entre diversos contaminantes (materia orgánica, nutrientes y metales) con los sólidos en suspensión presentes en las escorrentías (Andrés-Doménech *et al.*, 2018). Buena parte de los contaminantes se encuentran adheridos o formando parte de las partículas en suspensión, lo que se traduce en que, si los sólidos en suspensión (SS) son retenidos eficientemente en los sistemas de pavimento permeable, también lo serán los contaminantes asociados a ellos. Según la metodología de los índices de mitigación propuesta por CIRIA y adoptada por la guía de València, el nivel de tratamiento que proporcionan los sistemas de pavimento permeable frente a contaminantes como SS, metales pesados e hidrocarburos, es adecuado cuando los usos del suelo donde se instalan estas estructuras poseen niveles de riesgo de contaminación bajos y medios (Woods-Ballard *et al.*, 2015; De la Fuente *et al.*, 2021). Corresponden a estos usos caminos o viales con intensidades de tráfico muy bajas, pistas deportivas, zonas de uso lúdico, zonas de estacionamiento con poca renovación, zonas peatonales, entre otros.

En ciertas ocasiones, es posible el planteamiento de un sistema de pavimento permeable sobre un terreno con elevada capacidad drenante, cuya cuenca presente un elevado contenido de contaminantes susceptibles de ser lavados por las escorrentías. En estos casos, existe un gran peligro de contaminar el suelo subyacente, así como las aguas subterráneas, cuando éstas se encuentran a menos profundidad de la necesaria para asegurar el filtrado y retención de los contaminantes. Según Puertas *et al.* (2018), la distancia del fondo del sistema al nivel freático máximo estacional debe ser superior a 1.2 metros.

Técnicamente, una posible solución para prevenir los problemas de contaminación es la que viene propuesta por CIRIA y adoptada en las guías de València y Castelló de la Plana, la cual consiste en envolver el sistema de pavimento permeable mediante una geomembrana impermeable y flexible (Woods-Ballard *et al.*, 2015; Perales-Momparler *et al.*, 2019; De la Fuente *et al.*, 2021). No obstante, como solución extrema, algunas referencias como Puertas *et al.* (2018); Ajuntament de Barcelona, (2018) directamente no recomiendan la implantación de sistemas de infiltración en zonas industriales o próximas a gasolineras, donde la potencial contaminación de las escorrentías superficiales es incompatible con una infiltración de éstas al subsuelo.

Criterios estructurales

Desde el punto de vista estructural, son dos los aspectos fundamentales a comprobar: en primer lugar la adecuación funcional de la tipología del pavimento superficial (en base a los esfuerzos tangenciales y la resistencia a la abrasión necesarias para hacer frente al paso de los neumáticos y las maniobras del tráfico previsto), y en segundo lugar el espesor de las capas que conforman el sistema (necesarias para repartir las cargas de tráfico a soportar de forma que lleguen suficientemente atenuadas a la explanada). Para ambos casos, deben tenerse en cuenta las cargas del tráfico que debe soportar la estructura del firme y la calidad de la explanada sobre la que se ejecutará, además de la localización y el uso al que va destinado para acotar el aspecto estético y acabado superficial del sistema.

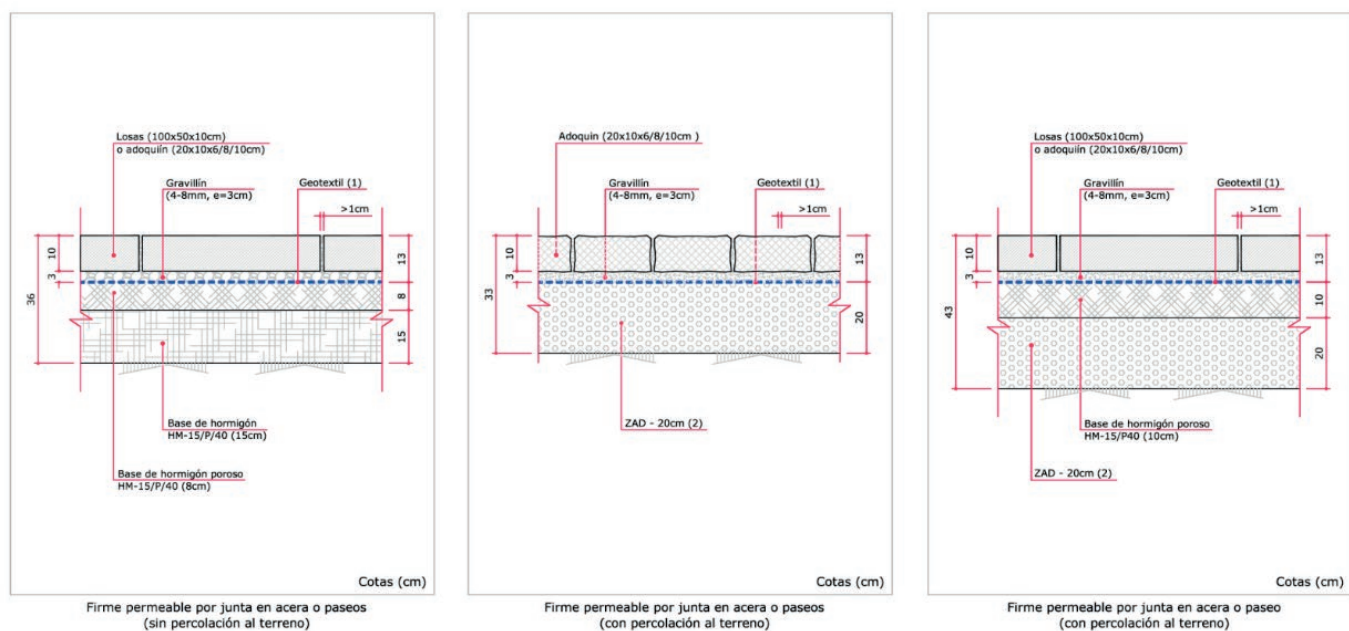


Figura 4 | Ejemplos de fichas con secciones estructurales de firmes permeables incluidas en la Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en Zonas Verdes y otros Espacios Públicos de Madrid (Ayuntamiento de Madrid, 2018).

La Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en Zonas Verdes y otros Espacios Públicos de Madrid (Ayuntamiento de Madrid, 2018), ofrece una serie de fichas con detalles constructivos y secciones estructurales de firmes permeables, indicadas para uso peatonal en aceras y paseos (Figura 4). En ellas se recomienda el tipo de pavimento a emplear, los distintos espesores para cada capa del sistema y características de los materiales como la granulometría, resistencia o capacidad drenante.

De manera más concisa, las guías de Barcelona y del MITECO basan sus recomendaciones en que las capas deben ser capaces de resistir las cargas producidas por el paso de vehículos de emergencia pesados (2500-3000 kg). Para ello, en el caso de que el sistema incluya subbase granular, establecen que su espesor mínimo sea de 30 cm, debiendo calcularse explícitamente cuando haya previsión de superar las cargas anteriores (MITECO, 2019; Ajuntament de Barcelona, 2020).

Es también habitual que sean los propios fabricantes de superficies permeables o porosas, quienes ofrezcan recomendaciones acerca del diseño de estos sistemas. La Figura 5 recoge un ejemplo que incluye la descripción de las capas que componen la sección, así como sus espesores, e información relativa a la categoría de tráfico a soportar por el pavimento y la calidad de la explanada sobre la que se asienta. Como puede observarse, aunque la comparación no es directa, sí que existe cierta convergencia entre las secciones propuestas por el Ayuntamiento de Madrid para usos peatonales y aceras (Figura 4) y éstas últimas para la categoría C4/S1.



Figura 5 | Secciones de pavimentos permeables recomendadas según categoría de tráfico y calidad de explanada (adaptado de Breinco, s.f.).

RECOMENDACIONES SOBRE LAS OPERACIONES DE LIMPIEZA Y MANTENIMIENTO

La exposición ambiental de los pavimentos permeables puede acarrear el deterioro y la pérdida de funcionalidad del sistema. Los sedimentos depositados directamente en la superficie o arrastrados por el viento o la escorrentía, procedentes de zonas adyacentes, provoca acumulaciones que pueden dar lugar a la colmatación de las distintas capas y, en consecuencia, la pérdida de permeabilidad en algunas zonas (Figura 6). Asimismo, el propio tráfico puede propiciar el desgaste y rotura del pavimento, dando lugar a problemas estructurales y de comodidad que requieran de actuaciones de bacheado o reparación de las superficies con materiales distintos de los originales (Sañudo-Fontaneda *et al.*, 2018).



Figura 6 | Vistas de superficie (izquierda) y de sección (derecha) de una porción de pavimento poroso colmatado (elaboración propia).

Por tanto, además de los criterios de diseño analizados anteriormente, es necesario prever y llevar a cabo un adecuado mantenimiento del sistema para garantizar un funcionamiento óptimo a lo largo del tiempo y prolongar su vida útil. Fundamentalmente, las tareas de mantenimiento se centran en el cuidado de la capa más superficial, siendo recomendable realizarlas en base a inspecciones periódicas cuya frecuencia varía en función de las precipitaciones y actividades llevadas a cabo en la zona (ej. si hay obras cercanas a los pavimentos permeables, deberán realizarse más inspecciones). Algunas de las principales consisten en el barrido o aspirado de la superficie permeable. Generalmente se recomienda su ejecución de forma semestral, especialmente durante la primavera y el otoño, pues son las estaciones del año en las que se puede producir arrastres con mayor aporte de material vegetal. Otro tipo de tareas consisten en restaurar y/o sustituir elementos estructurales dañados, así como corregir las posibles acumulaciones de vegetación o tierra en zonas adyacentes, evitando que queden elevadas sobre el nivel del pavimento. En estos casos se recomienda una frecuencia mínima de 5 años aproximadamente. Con menos frecuencia (cada 10-15 años) se recomienda la aspiración en profundidad de la superficie y subbase para recuperar la permeabilidad inicial si ésta se ha reducido significativamente a causa de la colmatación (Ayuntamiento de Madrid, 2018; Perales-Momparler *et al.*, 2019; Ajuntament de Barcelona, 2020; De la Fuente *et al.*, 2021). Por su parte, MITECO (2019) recomienda realizar al menos 3 operaciones de limpieza al año, preferiblemente al final de las diferentes épocas climatológicas.

ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL Y NECESIDADES FUTURAS

El número de guías y manuales de diseño de SUDS que se elaboran y forman parte de las normativas municipales es cada vez mayor ante la demanda creciente por parte de técnicos y administraciones de un marco de referencia. Dentro de los SUDS, los sistemas de pavimento permeable son una de las técnicas más interesantes de implementar, tanto por su gran eficiencia a la hora de gestionar agua de lluvia, como por su versatilidad estética y capacidad para integrarse en el ambiente urbano. La flexibilidad del diseño, junto con el amplio abanico de acabados de superficies permeables disponible, hacen que sean unas estructuras de firme totalmente personalizables y adaptables a la mayoría de las necesidades urbanas (De la Fuente *et al.*, 2021). Consecuentemente, el diseño de una sección de firme permeable debe realizarse contemplando todos los condicionantes particulares de cada actuación (Rodríguez-Hernández, 2008).

Los criterios de diseño recopilados de las actuales guías y manuales disponibles en España pueden catalogarse según 3 criterios fundamentales: hidrológicos e hidráulicos, medioambientales y estructurales. La información extraída en base al primer criterio se resume en la tabla 1. Los parámetros de diseño presentan homogeneidad en prácticamente todas las guías. Es especialmente importante que el diseño tenga en cuenta la climatología particular del lugar de aplicación (Fernández-Gonzalvo *et al.*, 2021) y su conveniente adecuación a escenarios que contemplen los efectos del cambio climático. En este sentido, cabe destacar la adaptación del parámetro “volumen de gestión” a la precipitación de la zona. Así, en localizaciones con lluvias cortas e intensas, como la costa mediterránea, se puede pensar en aljibes o depósitos de almacenamiento acoplados al pavimento permeable, para que éste pueda seguir funcionando en medio no saturado y así ofrecer una mayor capacidad volumétrica. Un buen ejemplo de este sistema lo constituye el conjunto pavimento permeable-aljibe del proyecto Life CerSUDS, consistente en un pavimento permeable dispuesto

sobre bases drenantes que percolan el agua al terreno, conduciendo el exceso a un depósito/canal situado bajo la superficie, que permite su recuperación para el riego de las zonas ajardinadas y que actúa también a modo de colector, laminando los caudales a la red municipal durante eventos de precipitación (Castillo-Rodríguez *et al.*, 2021).

Un factor de preocupación que destaca es la posible pérdida de permeabilidad del sistema a lo largo del tiempo, la cual puede afectar a las capas superficial (debido al sellado de los huecos, habitualmente por acumulaciones de sedimentos o vegetación) e inferiores (por fracciones más finas de los sedimentos arrastrados). Según el estudio de Sañudo-Fontaneda *et al.* (2018), superficies de pavimento de asfalto u hormigón poroso son susceptibles de colmatarse completamente tras 8 años de funcionamiento, mientras que superficies de adoquines con junta permeable se muestran más resilientes y resistentes frente a este proceso, pese a sufrir reducciones de su permeabilidad de entre el 30% y el 45% al cabo de 10 años de operación. Es por ello fundamental realizar un estudio o caracterización inicial de los posibles aportes que pueden generarse en la cuenca, susceptibles de afectar el sistema. Por ejemplo, si se prevén grandes aportaciones de detritus vegetales procedentes de ajardinamientos próximos o arbolado, deberá analizarse cuidadosamente la idoneidad de este sistema, o adoptar las precauciones necesarias para que estos elementos no alcancen la superficie del pavimento (Figura 7).

No obstante, es muy raro que se produzca el sellado completo de toda la superficie, por lo que seguirá existiendo suficiente capacidad de drenaje. En este sentido, y en previsión de la reducción de la permeabilidad de la superficie del sistema a lo largo de su vida útil, se recomienda que se aplique un factor reductor de seguridad de 10 a la capacidad de infiltración de la superficie permeable (Woods-Ballard *et al.*, 2015).



Figura 7 | Aporte de material vegetal superficial procedente de ajardinamiento contiguo (izquierda) y aporte de material vegetal procedente del arbolado (derecha). (Elaboración propia).

Respecto a los criterios medioambientales (Tabla 1), en las guías se encuentra escasa información al respecto. Es fundamental el soporte de los trabajos de investigación que vienen desarrollándose para potenciar la funcionalidad de los sistemas de pavimento permeable desde el punto de vista de tratamiento y remoción de distintos contaminantes. Así, en el proyecto HOFIDRAIN se analizó en laboratorio la colmatación de dos tipos de pavimentos permeables (asfalto poroso y adoquines porosos) con cargas de hasta 5 kg/m² de sedimentos recogidos en el viario. Tras varios ciclos de acumulación-precipitación la cantidad retenida de sedimentos en la superficie y la sección de pavimento fue superior al 95% (Naves *et al.*, 2021; Goya *et al.*, 2022). También se está estudiando la instalación de barreras reactivas o la integración de agentes reactivos en el sistema de pavimento permeable mediante el empleo de biochar, utilizando materiales residuales o subproductos como el fango deshidratado de ETAP. De este modo, la adsorción y la inducción a los procesos de biodegradación de contaminantes orgánicos pueden resultar de gran utilidad para evitar la contaminación del suelo o de las aguas subterráneas (García-Haba *et al.*, 2021b; Qi *et al.*, 2021). Otras actuaciones o reglas de gestión relacionadas con criterios ambientales, pueden ser la colocación de las tuberías de drenaje a cierta altura o con un codo para inducir la retención del agua durante cierto tiempo, favoreciendo así la eliminación de nitratos mediante el proceso biológico de desnitrificación y, por ende, reduciendo el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas por nitratos (Brown y Borst, 2015). Esta retención del agua también puede favorecer la biodegradación de contaminantes orgánicos y fecales (Hernández-Crespo *et al.*, 2019; García-Haba

et al., 2021a), fomentando así la posibilidad de reutilización de las aguas almacenadas en el propio sistema de pavimento permeable o en aljibes conectados al mismo. Un condicionante ambiental que también debe ser considerado es el pH de las aguas filtradas por los pavimentos permeables. Estudios recientes han demostrado que el hormigón poroso puede provocar un incremento importante de esta variable de calidad de aguas, alcanzándose valores de hasta 12, teniendo como consecuencia un posible impacto negativo en el medio receptor (Hernández-Crespo *et al.*, 2019). Es conveniente destacar que estos altos niveles de pH se mantienen constantes durante los primeros meses de funcionamiento, y disminuyen con el lavado progresivo de material (Fernández-Gonzalvo *et al.*, 2021). En este sentido se podría plantear un lavado controlado del propio material, previo a su instalación, con el fin de evitar que las aguas filtradas impacten negativamente sobre el medio ambiente. Como alternativa a este condicionante, sería optar por materiales que no provoquen estos efectos, como los adoquines con junta permeable (García-Haba *et al.*, 2021b).

Tabla 1 | Resumen de criterios hidrológicos e hidráulicos, y ambientales.

	A	B	C	D
Criterios hidrológicos e hidráulicos				
Volumen de gestión	V ₈₀	V ₈₀	V ₈₀	V ₆₀ - V ₉₅
Relación área impermeable / área permeable	2:1	2:1	2:1	2:1
Permeabilidad:				
Del pavimento	≥ 2500 mm/h	≥ 4500 mm/h	≥ 2000 mm/h	≥ 4500 mm/h
Factor reductor de seguridad	-	10	-	10
De la explanada con objetivo de infiltrar	≥ 3.60 mm/h ⁱ	≥ 3.60 mm/h ⁱ	≥ 3.60 mm/h ⁱ	≥ 3.60 mm/h ⁱ
Pendiente del sistema	≤ 3% ⁱⁱ	≤ 3% ⁱⁱ	No recomienda su instalación cuando la pendiente de la cuenca drenante sea > 2-3%.	≤ 3% ⁱⁱ
Tiempo de vaciado	≤ 48 horas	≤ 48 horas	*	≤ 48 horas
Criterios ambientales				
Protección del suelo subyacente y de las aguas subterráneas	*	Mediante envoltura del sistema con geomembrana impermeable y flexible	*	Mediante envoltura del sistema con geomembrana impermeable y flexible

A: Ayuntamiento de Madrid, (2018); B: Perales-Momparler *et al.*, 2019; C: Ajuntament de Barcelona, (2020); D: De la Fuente *et al.* (2021).

ⁱ Evacuar la escorrentía almacenada mediante tubería de drenaje si no es posible la infiltración.

ⁱⁱ Ejecutar terrazas o barreras transversales al flujo cuando la pendiente es > 3%.

* Sin dato

En cuanto a los criterios estructurales (Tabla 2), las guías ofrecen información generalmente bien definida en cuanto a los tipos de capa que componen la sección del sistema, así como acerca de los materiales de construcción a utilizar. Cuando se trata de definir los espesores de las distintas capas, especialmente de la subbase, el valor obtenido según el criterio hidrológico e hidráulico es generalmente mayor y prevalece sobre el criterio estructural (ej. el criterio estructural se cumple sobradamente en aceras y firmes con tráfico ligero con una base granular de 30 cm de espesor debido a criterios hidráulicos). En cualquier caso, son los técnicos municipales, con ayuda de las empresas y marcas que comercializan los materiales que constituyen las superficies permeables, las que más información ofrecen al respecto, debiendo garantizar la adecuada resistencia de la superficie al tráfico esperado, además de comprobar la calidad y espesores de los materiales empleados en las capas inferiores, y también las condiciones de la explanada. A nivel municipal, el mayor detalle se encuentra en la guía básica de diseño de Madrid, siendo los planos de detalles de secciones tipo que incluye el documento, un ejemplo a seguir (Ayuntamiento de Madrid, 2018). Es por tanto necesaria la elaboración de este tipo de información gráfica adaptada a la normativa municipal, para que sea incorporada en las prescripciones técnicas de los proyectos de urbanización. Para ello, se pueden tomar como referencia los catálogos de secciones de firmes existentes a nivel municipal, incluyendo aquellas secciones permeables que mejor se ajusten a las particularidades, necesidades y preferencias de cada ciudad.

Tabla 2 | Resumen de criterios estructurales.

Uso o tráfico a soportar	A						B			C	
	Acera tipo A	Acera tipo B	Acera tipo C	Aceras y paseos	Aparcamientos	Carril bici	Aceras y paseos	Parques y zonas de recreo, no accesibles a VP	Restringido a VP de emergencia	Restringido a VP de emergencia	
Tipología de pavimento	AP			LP o AP	AA u HP	MPCP	PPJ	Pavimentos porosos	*	*	
Material y espesor de las capas											
**Capa de asiento	Gravillín - 3 cm						*	*	*	*	*
Base	Grava (15 cm)	HP (10 cm)	CD (>50mm)	HP (10-15 cm)	HP (8-20 cm) o grava (35 cm)	HP (15 cm)	*	*	*	*	
Subbase	*	ZAD (20 cm)	ZAD (20 cm)	HM (15 cm) o ZAD (20 cm)	HM (23 cm) o ZAD (20 cm)	ZAD (20 cm)	*	*	≥ 30 cm	≥ 30 cm	

AA: Adoquín autoblocante; AP: Adoquín permeable por junta o por material; CD: Celdas drenantes; HM: Hormigón en masa; HP: Hormigón poroso; LP: Losa permeable; VP: Vehículos pesados; PPJ: Pavimentos permeables por junta; ZAD: Zahorra artificial drenante; MPCP: Mezcla bituminosa en caliente porosa A: Ayuntamiento de Madrid, (2018); B: MITECO, (2019); C: Ajuntament de Barcelona, (2020).

* Sin dato.

** En superficies de tipo adoquín, la cama de asiento se puede considerar como base.

Para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de pavimento permeable, es necesario un adecuado plan de limpieza y mantenimiento (Tabla 3). En este aspecto, todas las guías muestran coherencia y homogeneidad en sus recomendaciones. Hay que destacar la atención que debe prestarse a las técnicas de barrido y aspirado, ya que el empleo de una u otra vendrá determinado por el tipo de superficie permeable. Según los medios de ejecución, puede ser manual mediante escoba, o mecánica empleando sistemas por aire o vehículos de limpieza por barrido y aspiración. En el caso de pavimentos permeables por junta (adoquines), es recomendable la técnica de barrido manual o mediante soplador para evitar la pérdida del material granular contenido en las juntas. Por el contrario, para pavimentos porosos (asfalto poroso y hormigón poroso), se recomienda el empleo de vehículo de limpieza. En el contexto español, no se dispone de referencias que estudien la influencia del método de limpieza en la recuperación de la permeabilidad, y por ende del funcionamiento, de los sistemas de pavimento permeable. No obstante, referencias internacionales apuntan que métodos de limpieza basados en aspiración a baja intensidad, y lavados con agua a alta y baja presión, consiguen restituir la permeabilidad entre un 4% y un 66% en superficies de hormigón poroso, y entre un 2% y un 6% en adoquines con junta permeable (Wu *et al.*, 2022). Estudios recientes recomiendan reducir la frecuencia de las tareas de barrido y aspirado a 1 mes para evitar la generación de escorrentía, especialmente ante la llegada de eventos de lluvia de alta intensidad (Fernández-Gonzalvo *et al.*, 2020). En el caso de pavimentos vegetales (césped reforzado) debe garantizarse un riego mínimo que dependerá de la especie vegetal utilizada (MITECO, 2019).

Tabla 3 | Resumen de tareas de mantenimiento.

	A	B	C	D	E
Inspección del estado general	*	Regularmente. Preferiblemente después de lluvias intensas	6 meses	Una al mes durante los 3 primeros meses y posteriormente cada 6 meses	6 meses
Eliminación de sedimentos y residuos sólidos (barrido o aspirado de la superficie)	A demanda	3 veces al año	6 meses	6 meses	6 meses
Eliminación de vegetación no deseada	*	3 veces al año	1 año	3 años	
Corrección de niveles de tierra o vegetación en áreas colindantes	*	*	5 años	5 años	A demanda
Reparación de adoquines, depresiones o grietas	*	*	5 años	5 años	A demanda
Aspiración en profundidad de la superficie y la capa de subbase	Al cabo de los años	*	10-15 años	15 años	10-15 años
Reemplazo del material de las juntas	*	*	*	*	A demanda
Mantenimiento de la vegetación	*	3 veces al año	*	*	*

A: Ayuntamiento de Madrid, (2018); B: MITECO, (2019); C: Perales-Momparler *et al.*, 2019; D: Ajuntament de Barcelona, (2020); E: De la Fuente *et al.*, 2021

* Sin dato.

CONCLUSIONES

Los sistemas de pavimento permeable constituyen una de las técnicas SUDS más completa, versátil, multifuncional y estudiada en todo el mundo. También en España viene realizándose un gran esfuerzo en la actividad innovadora, propiciando la generación de una base científica sólida y ampliando los conocimientos sobre estas estructuras de firmes que son resilientes al paso del agua. Como consecuencia, cada vez se encuentra más cantidad de información acerca de los sistemas de pavimento permeable en las guías y manuales de diseño de SUDS. Estos documentos se están consolidando como herramientas de diseño muy útiles y completas, de fácil acceso para los técnicos competentes. Sin embargo, existe la necesidad de ampliar los recursos disponibles que sirvan de base e impulsen la creación de normativa municipal sobre SUDS adaptadas a cada caso particular. Únicamente de este modo será posible incluir secciones permeables en los catálogos de firmes de cada ciudad, de forma que la implementación de los sistemas de pavimentos permeables quede debidamente integrada según las necesidades y particularidades de cada municipio.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha desarrollado en el marco de los proyectos ENGODRAIN (Ref. RTI2018-094217-B-C31) MELODRAIN (RTI2018-094217-B-C32) y POREDRAIN (RTI2018-094217-B-C33) financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER Una manera de hacer Europa). Eduardo García Haba agradece la ayuda para contratos predoctorales para la formación de doctores de la convocatoria de 2019 (Ref. PRE2019-089409) financiada por MCIN/AEI /10.13039/501100011033 y por “FSE invierte en tu futuro”.

REFERENCIAS

- Ajuntament de Barcelona. 2020. Guia tècnica per al disseny de sistemes de drenatge urbà sostenible SUDS. Comissió de SUDS de l'Ajuntament de Barcelona.
- Andrés-Doménech, I., Hernández-Crespo, C., Martín, M., Andrés-Valeri, V.C. 2018. Characterization of wash-off from urban impervious surfaces and SuDS design criteria for source control under semi-arid conditions. *Science of The Total Environment*, 612, 1320-1328. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.09.011>
- Andrés-Doménech, I., Anta, J., Perales-Momparler, S., Rodríguez-Hernández, J. 2021. Sustainable urban drainage systems in Spain: A diagnosis. *Sustainability* (Switzerland), 13(5), 1-22. <https://doi.org/10.3390/su13052791>
- Andrés-Valeri, V.C., Castro-Fresno, D., Sañudo-Fontaneda, L.A., Rodríguez-Hernández, J. 2014. Comparative analysis of the outflow water quality of two sustainable linear drainage systems. *Water Science and Technology*, 70(8), 1341-1347. <https://doi.org/10.2166/WST.2014.382>
- Araque, K., Palacios, P., Mora, D., Chen-Austin, M. 2021. Biomimicry-Based Strategies for Urban Heat Island Mitigation: A Numerical Case Study under Tropical Climate. *Biomimetics*, 6(3), 48. <https://doi.org/10.3390/BIOMIMETICS6030048>
- Ayuntamiento de Madrid. 2018. Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en Zonas Verdes y otros Espacios Libres. Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad. Dirección General de Gestión del Agua y Zonas Verdes.
- Beecham, S., Pezzaniti, D., Kandasamy, J. 2015. Stormwater treatment using permeable pavements. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 165(3), 161-170. Thomas Telford Ltd. <https://doi.org/10.1680/WAMA.2012.165.3.161>
- Boletín Oficial de Canarias. Decreto 52/2015, de 16 de Abril, por el que se dispone la suspensión de la vigencia del Plan Hidrológico insular de El Hierro, Aprobado por el Decreto 102/2002, de 26 de Julio, y se aprueban las Normas Sustantivas Transitorias de Planificación Hidrológica. Disponible online: <http://www.gobiernodecanarias.org/boc/2015/086/002.html>

- Boletín Oficial de la Región de Murcia (a). Ley 13/2015, de 30 de Marzo, de Ordenación Territorial y Urbanística de la Región de Murcia.
- Boletín Oficial de la Región de Murcia (b). Decreto-Ley no. 2/2019, de 26 de Diciembre, de Protección Integral del Mar Menor. Disponible online: <https://www.boe.es/caa/borm/2019/298/s36008-36089.pdf>
- Breincó (s.f.). <https://www.breincó.com/es/> [Consulta: 14 de julio de 2022]
- Brown, R.A., Borst, M. 2015. Nutrient infiltrate concentrations from three permeable pavement types. *Journal of Environmental Management*, 164, 74-85. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2015.08.038>
- Canal de Isabel II. Normas para Redes de Saneamiento. Versión 3. 2020. Disponible online: https://www.canaldeisabelsegunda.es/documents/20143/79037/2016_Normas_Redde_Saneamiento.pdf/e1461e6b-3e64-8356-2b8f-05ee9845c4d8
- Castillo-Rodríguez, J.T., Andrés-Doménech, I., Martín, M., Escuder-Bueno, I., Perales-Momparler, S., Mira-Peidro, J. 2021. Quantifying the Impact on Stormwater Management of an Innovative Ceramic Permeable Pavement Solution. *Water Resources Management*, 35(4), 1251-1271. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02778-7>
- Castro-Fresno, D., Rodríguez-Bayón, J., Rodríguez-Hernández, J., Ballester-Muñoz, F. 2005. Sustainable drainage systems (SUDS). *Interciencia*, 30, 255-260+306.
- City of Rockville. 2018. Permeable Pavement Design Guide. <https://www.rockvillemd.gov/DocumentCenter/View/33475/Permeable-Pavement-Design-Guide>
- De la Fuente-García, L., Perales-Momparler, S., Rico-Cortés, M., Andrés-Doménech, I., Marco-Segura, J.B. 2021. Guía básica para el diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible en la ciudad de València. Cicle Integral de l'Aigua. Ajuntament de València.
- Diari Oficial de la Comunitat Valenciana (a). Ley 5/2014, de 25 de Julio, de la Generalitat, de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Paisaje, de la Comunitat Valenciana. Disponible online: <https://www.dogv.gva.es/es/eli/es-vc/l/2014/07/25/5/>
- Diari Oficial de la Comunitat Valenciana (b). Decreto 201/2015, de 29 de Octubre, del Consell, por el que se aprueba el Plan de Acción Territorial sobre prevención del riesgo de inundación en la Comunitat Valenciana. Disponible online: <https://www.dogv.gva.es/es/eli/es-vc/d/2015/10/29/201/>
- Drake, J., Bradford, A., Marsalek, J. 2013. Review of environmental performance of permeable pavement systems: State of the knowledge. *Water Quality Research Journal of Canada*, 48(3). <https://doi.org/10.2166/wqrjc2013.055>
- Elizondo-Martínez, E.J., Andrés-Valeri, V.C., Rodríguez-Hernández, J., Castro-Fresno, D. 2019. Proposal of a new porous concrete dosage methodology for pavements. *Materials*, 12(19), 3100. <https://doi.org/10.3390/MA12193100>
- Fernández-Gonzalvo, M., Hernández-Crespo, C., Martín, M., Andrés-Doménech, I. 2021. Comparison of permeable pavements effluent under Atlantic and Mediterranean rainfall regimes: A mid-term laboratory experience. *Building and Environment*, 206, 108332. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108332>
- García-Haba, E., Hernández-Crespo, C., Martín, M., Albentosa, E., Andrés-Doménech, I. 2021a. Permeable pavements as stormwater storage systems for water reuse in a Mediterranean city and evaluation of their treatment capacity. *Proceedings of the 15th International Conference on Urban Drainage*. Melbourne, Australia, 25-28 de octubre, 2021.
- García-Haba, E., Hernández-Crespo, C., Martín, M., Andrés-Doménech, I. 2021b. Addition of drinking water treatment sludge into permeable pavements for phosphorus control in infiltrated runoff water. *Proceedings of the 2nd IAHR Young Professionals Congress* (pp. 37-38). Online, IAHR-YPN.
- Giménez-Maranges, M., Breuste, J., Hof, A. 2020. Sustainable Drainage Systems for transitioning to sustainable urban flood management in the European Union: A review. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120191. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.120191>

- Goya, A., Naves, J., Anta, J., Suárez, J., Jácome, A., Viturro, R. 2022. Permeable pavement clogging laboratory experiments using rainfall simulators. In M. Ortega-Sánchez (Ed.), *Proceedings of 39th IAHR World Congress* (pp. 1590-1596). IAHR. <https://doi.org/10.3850/IAHR-39WC252171192022251>
- Grupo Sprilur. Guía para el Desarrollo Sostenible de los Proyectos de Urbanización. Available online: http://www.guiaurbanizacionsprilur.com/pdf/Guia_completa_v2.pdf
- Gupta, A. 2022. *Estudio para la mejora de mezclas asfálticas porosas con una selección multicriterio de aditivos y un nuevo betún modificado con polímeros*. Tesis doctoral. Universidad de Cantabria.
- Gupta, A., Castro-Fresno, D., Lastra-Gonzalez, P., Rodríguez-Hernández, J. 2021a. Selection of fibers to improve porous asphalt mixtures using multi-criteria analysis. *Construction and Building Materials*, 266, 121198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121198>
- Gupta, A., Slebi-Acevedo, C.J., Lizasoain-Arteaga, E., Rodríguez-Hernández, J., Rubio-Gámez, M., Moreno-Navarro, F. 2021b. Multi-Criteria Selection of Additives in Porous Asphalt Mixtures Using Mechanical, Hydraulic, Economic, and Environmental Indicators. *Sustainability*, 13(4), 2146. <https://doi.org/10.3390/SU13042146>
- Hernández-Crespo, C., Fernández-Gonzalvo, M., Martín, M., Andrés-Doménech, I. 2019. Influence of rainfall intensity and pollution build-up levels on water quality and quantity response of permeable pavements. *Science of The Total Environment*, 684, 303-313. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.271>
- Jato-Espino, D., Charlesworth, S.M., Bayón, J.R., Warwick, F. 2016. Rainfall–Runoff Simulations to Assess the Potential of SuDS for Mitigating Flooding in Highly Urbanized Catchments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(1), 149. <https://doi.org/10.3390/IJERPH13010149>
- Jato-Espino, D., Rodríguez-Hernández, J., Castro-Fresno, D. 2019. *Pavimentos urbanos permeables*. <https://www.researchgate.net/publication/333134479>
- Kappou, S., Souliotis, M., Papaefthimiou, S., Panaras, G., Paravantis, J.A., Michalena, E., Hills, J.M., Vouros, A.P., Dimenou, K., Mihalakakou, G. 2022. Review Cool Pavements: State of the Art and New Technologies. *Sustainability* (Switzerland), 14(9). <https://doi.org/10.3390/su14095159>
- Life CerSUDS. (s.f.). <https://www.lifecersuds.eu> [consulta: 24 de agosto de 2022]
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. 2016. BOE-A-2016-12466 Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, el Reglamento de Planificación Hidrológica, aprobado por el Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, y otros reglamentos en materia de gestión de riesgos de inundación, caudales ecológicos, reservas hidrológicas y vertidos de aguas residuales. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2016/12/09/638>
- MITECO. 2019. Guías de adaptación al riesgo de inundación: Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. Ministerio para la transición ecológica, Secretaría General Técnica, Centro de Publicaciones. NIPO: 638-18-030-2.
- Molist, J., Núñez, L., Lacoma, C. 2011. Aprofitament d’Aigua de Pluja a Catalunya. Dimensionament de Dipòsits d’Emmagatzematge. Agència Catalana de l’Aigua. Barcelona, Spain.
- Naves, J., Anta, J., Suárez, J., Pazos, D., Goya, A., Jácome, A., Viturro, R. 2021. Study of clogging of a porous concrete pavement system using a rainfall simulator. *15th International Conference on Urban Drainage*. Melbourne, Australia, 25-28 de octubre, 2021.
- Oral, H.V., Carvalho, P., Gajewska, M., Ursino, N., Masi, F., van Hullebusch, E.D., Kazak, J.K., Exposito, A., Cipolletta, G., Andersen, T.R., Finger, D.C., Simperler, L., Regelsberger, M., Rous, V., Radinja, M., Buttiglieri, G., Krzeminski, P., Rizzo, A., Dehghanian, K., Nikolova, M., Zimmermann, M. 2020. A review of nature-based solutions for urban water management in European circular cities: a critical assessment based on case studies and literature. *Blue-Green Systems*, 2(1), 112-136. <https://doi.org/10.2166/BGS.2020.932>
- Perales-Momparler, S., Calcerrada-Romero, E., Badenes-Catalán, C., Beltrán-Pitarch, I. 2019. Guía básica de diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible para el término municipal de Castelló de la Plana. Ayuntamiento de Castelló de la Plana.

- Pratt, C.J., Mantle, J.D. G., Schofield, P.A. 1989. Urban stormwater reduction and quality improvement through the use of permeable pavements. *Urban Discharges and Receiving Water Quality Impacts*, 123-132. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-037376-8.50017-4>
- Pratt, C., Wilson, S., Cooper, P. 2002. *Source control using constructed pervious surfaces: hydraulic, structural and water quality performance issues*. CIRIA.
- Puertas-Agudo, J., Suárez-López, J., Anta-Álvarez, J. 2008. Gestión de las aguas pluviales. Implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano. Madrid: Ministerio de Fomento, 600 p (Monografías CEDEX; 98) D.L.M. 56236-2008. — ISBN 978-84-7790-475-5.
- Qi, Y., Liu, Y., Qiu, D.Y., Li, T. 2021. Effect of biochar particles applied in bedding course of the innovative permeable pavement on enhancing nitrogen removal. *Water Science and Technology*, 84(7), 1693-1703. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.331>
- Rodríguez-Bayón, J. 2008. *Análisis de los aspectos de depuración y degradación de los hidrocarburos presentes en las aguas procedentes de la escorrentía urbana, en los firmes permeables*. Tesis doctoral. Universidad de Cantabria.
- Rodríguez-Bayón, J., Castro-Fresno, D., Newman, A.P. 2005. Pervious Pavement Research in Spain: Hydrocarbon Degrading Microorganisms. *Conference: 10th International Conference on Urban Drainage (ICUD)*. <https://www.researchgate.net/publication/253592814>
- Rodríguez-Hernández, J. 2008. *Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráfico ligero*. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria.
- Rodríguez-Hernández, J., Andrés-Valeri, V.C., Calzada-Pérez, M.A., Vega-Zamanillo, Ángel, Castro-Fresno, D. 2015. Study of the Raveling Resistance of Porous Asphalt Pavements Used in Sustainable Drainage Systems Affected by Hydrocarbon Spills. *Sustainability*, 7(12), 16226-16236. <https://doi.org/10.3390/SU71215812>
- Sambito, M., Severino, A., Freni, G., Neduzha, L. 2021. A Systematic Review of the Hydrological, Environmental and Durability Performance of Permeable Pavement Systems. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 4509, 13(8)*, 4509. <https://doi.org/10.3390/SU13084509>
- Sañudo-Fontaneda, L.A. 2014. *Análisis de la infiltración de agua de lluvia en firmes permeables con superficies de adoquines y aglomerados porosos para el control en origen de inundaciones*. Tesis doctoral. Universidad de Cantabria.
- Sañudo-Fontaneda, L.A., Andrés-Valeri, V.C., Rodríguez-Hernández, J., Castro-Fresno, D. 2014a. Field Study of Infiltration Capacity Reduction of Porous Mixture Surfaces. *Water*, 6(3), 661-669. <https://doi.org/10.3390/W6030661>
- Sañudo-Fontaneda, L.A., Charlesworth, S.M., Castro-Fresno, D., Andrés-Valeri, V.C., Rodríguez-Hernández, J. 2014b. Water quality and quantity assessment of pervious pavements performance in experimental car park areas. *Water Science and Technology*, 69(7), 1526-1533. <https://doi.org/10.2166/WST.2014.056>
- Sañudo-Fontaneda, L.A., Andrés-Valeri, V.C., Costales-Campa, C., Cabezón-Jiménez, I., Cadenas-Fernández, F. 2018. The Long-Term Hydrological Performance of Permeable Pavement Systems in Northern Spain: An Approach to the “End-of-Life” Concept. *Water*, 10(4), 497. <https://doi.org/10.3390/W10040497>
- Scholz, M., Grabowiecki, P. 2007. Review of permeable pavement systems. *Building and Environment*, 42(11), 3830-3836. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2006.11.016>
- Sociedad Pública de Gestión Ambiental Gobierno Vasco. Manual Para la Redacción de Planeamiento Urbanístico Con Criterios de Sostenibilidad. Disponible online: https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/guia_planeamiento_2/es_doc/adjuntos/guia_2.pdf (accessed on 14 October 2020).
- Woods-Ballard, B., Wilson, Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., Kellagher, R. 2015. *The SuDS Manual*. <https://www.ciria.org>

Wu, Y., Li, J., Zhang, X., Lin, C., Guo, X., Zhang, X. 2022. A systematic field effectiveness evaluation of three maintenance measures for three permeable pavements. *Construction and Building Materials*, 352, 128821. <https://doi.org/10.1016/J.conbuildmat.2022.128821>

Xunta de Galicia. Instrución Técnicas para Obras Hidráulicas em Galicia (vol. 2). Disponible online: https://augasdegalicia.xunta.gal/c/document_library/get_file?folderId=216484&name=DLFE-17836.pdf

Zölch, T., Henze, L., Keilholz, P., Pauleit, S. 2017. Regulating urban surface runoff through nature-based solutions - An assessment at the micro-scale. *Environmental Research*, 157, 135-144. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2017.05.023>