¡BAJO EL ASFALTO, LOS ADOQUINES!

beca de investigación sobre paisaje urbano e intervención en el espacio público

¡BAJO EL ASFALTO, LOS ADOQUINES!

proyecto de investigación sobre los servicios ecosistémicos de distintos pavimentos

María Núñez Rodríguez
arquitecta ETSAM 2015

En un contexto de cambio climático, se producen episodios de riesgo con una frecuencia e intensidad cada vez mayor. En las ciudades, el sellado de suelos amplifica los efectos de estos fenómenos. Una respuesta convencional a este problema consiste en realizar grandes inversiones para ampliar infraestructuras duras -que necesitan de un amplio mantenimiento y de grandes inversiones, a la vez que no proponen ningún valor adicional a las ciudades ni al espacio público.

Sin embargo, una respuesta basada en "infraestructuras blandas", en soluciones basadas en la naturaleza (SBN) o en técnicas de restauración de ecosistemas puede permitir, con un coste similar, aportar un gran valor paisajístico y ambiental a la ciudad. Los pavimentos -epidermis visible de los suelos urbanos- pueden constituir, si se cambia su enfoque, una estrategia de mitigación del cambio climático dispersa e invisible que se desarrolla en toda la ciudad y mejora la vida de los ciudadanos. Es una forma de infraestructura verde mínima, casi imperceptible, latente en los pies de la ciudad.

"¡Bajo el asfalto, los adoquines!" hace referencia a la pérdida de pavimentos parcialmente permeables que cubrían nuestra ciudad hace más de 50 años y que ahora han desaparecido por completo. Este documento trata de establecer unos criterios mínimos que ayuden a la toma de decisiones y permitan tener un criterio sólido en el diseño de pavimentos, de forma que estos provean, a través de distintos sistemas de permeabilidad, algunos servicios ecosistémicos.

En un primer momento, se estudia la influencia del sellado en el medio ambiente urbano y los distintos tipos de pavimentos que pueden ser una alternativa parcial al mismo. Durante la segunda parte, se realiza un análisis de las propiedades de los pavimentos que intervienen en el mantenimiento de algunos servicios ecosistémicos ligados al ciclo del agua, a la temperatura, a la contaminación y a la vegetación. Finalmente, en el tercer apartado se desarrollan fichas por tipo de pavimento, en que se resumen las características de cada pavimento y sus propiedades.

INDICE

El suelo en entornos urbanos 07

Introducción al pavimento 09

Definición de pavimento

Pavimento como sistema

Pavimentos convencionales en Madrid

Objetivos y límites del proyecto

Características principales 13

Variabilidad

Sellado y Compactación

Presencia de infraestructuras enterradas

Contaminación y pH

Estructura pedregosa

Efectos del sellado y la compactación de suelos en el medio ambiente 18

Efectos sobre el balance hídrico

Efectos sobre la temperatura

Efectos sobre la contaminación

Efectos sobre la vegetación y la fauna

Objeto de estudio: Pavimentos alternativos al sellado de suelos 21

Pavimentos alternativos al sellado completo

Pavimentos o superficies objeto de estudio

Construcción

Análisis comparativo 41

Ciclo del agua 43

Introducción a la gestión sostenible del agua de lluvia

Objetivos de diseño de pavimentos

Influencia de las condiciones de contexto

Escorrentía e infiltración

Evaporación

Temperatura 58

Pavimentos e isla de calor

Tipos de porosidad

Contaminación 64

Retención de contaminantes

Prevención indirecta de la contaminación

Capacidad para retener contaminantes del aire

La contaminación como foco de degradación de los PP

Terrizos, focos de contaminación

Vegetación y hábitats 72

Pavimentos como soporte de vegetación

Interacción entre pavimentos o suelos y crecimiento de árboles

Otras alternativas a la compactación

Proyectos innovadores

Problemas frecuentes

Notas adicionales 85

Influencia en el olor

Protección del patrimonio

Contaminación acústica

Accesibilidad

Minimización de recursos

Precios

Características por tipo de pavimentos 95

Pavimentos permeables 96

Adoquines con juntas filtrantes

Asfalto y hormigones porosos

Con vegetación

Pavimentos tradicionales 102

Adoquín pequeño o portugués

Adoquín “madrileño” o sampietrino

Losas o piezas grandes

Cantos de morro | Chino cordobés

Cerámicos

Terrizos 112

Mezclas arcillosas o arenosas

Alcorques 114

Según mantenimiento

Conclusiones (I) 117

Conclusiones (II) 118

Bibliografía 123

Agradecimientos 127

El suelo en entornos urbanos

Para realizar un estudio sistemático sobre los pavimentos urbanos es necesario comprender las distintas interacciones de los mismos.

En un primer momento, se desarrolla un pequeño capítulo de introducción al pavimento en que se explican las interacciones de éste y el alcance del estudio. El pavimento es la capa superficial del suelo urbano, y por ello es necesario comprender qué características tiene y qué servicios ecosistémicos puede aportar a la ciudad según su tratamiento. Con este objetivo se desarrolla un capítulo sobre los suelos urbanos. Éste se acompaña con un capítulo sobre los efectos del sellado de suelos en la ciudad. Finalmente, se explican los tipos de pavimentos y acabados en los que este estudio estará centrado.

Introducción al pavimento

Definición del pavimento

Existen cientos de definiciones de pavimento. A través de dos de ellas se configura una definición de pavimentos para este documento.

La RAE propone una definición algo ambigua: Pavimento: del lat. *Pavimentum.* m. "Superficie artificial que se hace para que el piso esté sólido y llano". Esta definición implica varias cosas: una superficie de origen antrópico y una voluntad de uso intenso por seres humanos.

Por otra parte, una de las definiciones de suelo en el ámbito de la edafología es: "el producto de una serie de factores activos (hombre, clima, seres vivos, relieve, tiempo), sobre un material "pasivo" -la roca madre. Es la interfaz entre la litosfera, la biosfera y la atmósfera. Es un medio para el crecimiento de la vegetación, regula los flujos de agua, se ocupa de reciclar nutrientes, supone un filtro para los contaminantes y es un soporte para estructuras".

Interpretar estas dos definiciones de forma complementaria puede dar lugar a la siguiente:

Pavimento: la capa o las capas superficiales y artificiales de los suelos urbanos que permiten una superficie sólida y llana para el uso humano.
Son la capa superficial del suelo en el espacio abierto. Su diseño influye en las funciones que realiza el suelo.

A su vez la esfera urbana se puede subdividir y clasificar en diferentes ámbitos: el uso público, el uso privado, la movilidad, la economía, la gestión de recursos y el diseño urbano, entre otros.

Así pues, es necesario entender los límites de esta investigación, y tener en cuenta que los pavimentos en el espacio público se deben comprender como un sistema ligado a:
-la movilidad
-las instalaciones e infraestructuras urbanas
-los usos del espacio público
-los usos del espacio privado colindante
-el medio físico en que se encuentran
-los sistemas de drenaje urbano de agua de lluvia
-la identidad y el modelo de ciudad
-la gestión y el mantenimiento de la ciudad

Un acercamiento genérico al paisaje urbano requiere plantearse todos estos elementos a la vez, y realizar propuestas que comprendan e integren estas interacciones.

Figura A.01: Pavimento en el espacio público como interfaz entre la edafosfera y la esfera urbana

Pavimento como sistema

Sistema constructivo

El diseño urbano de calles y espacios públicos requiere de la ordenación de distintos usos, en algunos casos excluyentes entre sí. Esta organización se puede y se suele dar a través de acabados distintos y a través de bordes, encuentros y detalles. El cuidado de estos detalles es esencial para una buena "lectura" del espacio urbano. Antonio Lopera (Lopera, 1986 y 2007) define la importancia de pensar el espacio público urbano desde esta perspectiva. El conjunto de superficies y bordes constituyen un sistema.

Sin embargo, en este documento se estudian exclusivamente superficies, sin tener en cuenta el "sistema de diseño urbano".

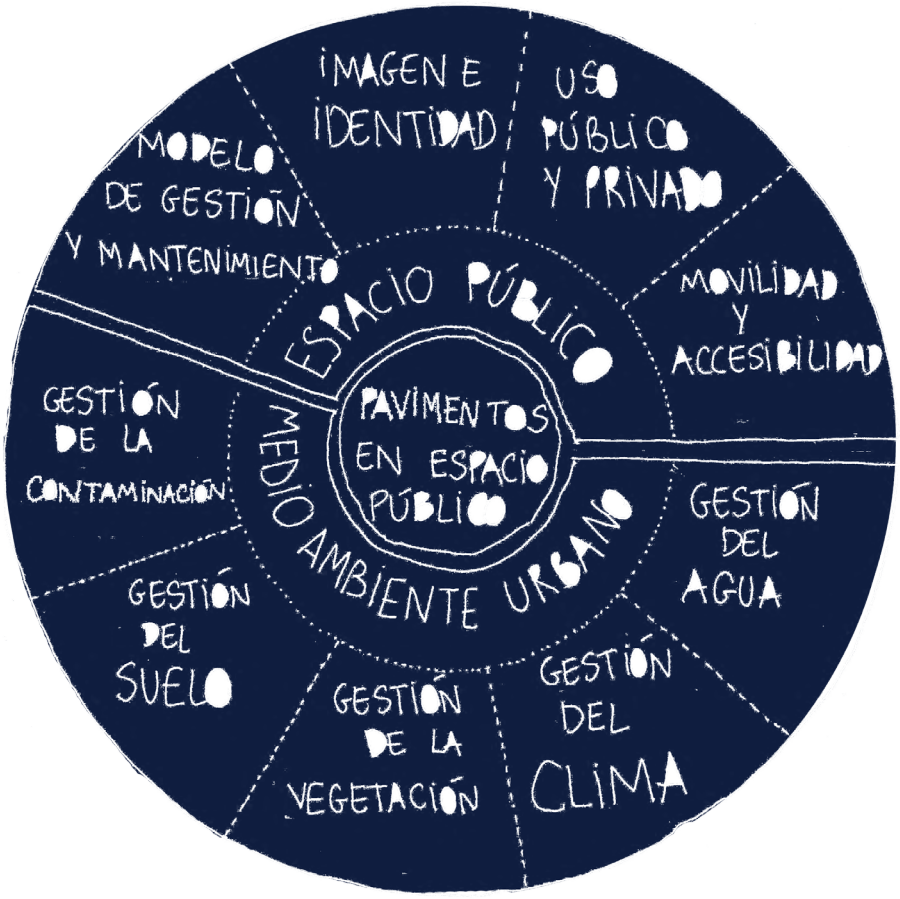


Figura A.02: Elementos que interaccionan con el pavimento en espacios urbanos

Sistema de uso

También Antonio Lopera, en sus estudios sistemáticos sobre pavimentos (Lopera, 1986 y 2007), reflexiona sobre la relación entre identidad urbana y tratamientos superficiales y a los modos de circular o pasearse en la ciudad.

En particular, distingue entre las superficies transitables y las no transitables, o más bien, las que invitan a circular y las que invitan a pararse,

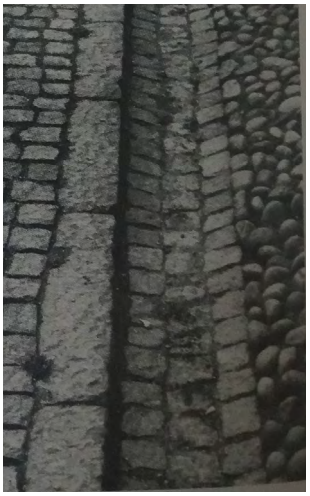


Figura A.03-04: Importancia de los detalles: Patio de honor del Palacio Real de Estocolmo (Lopera, 1986)

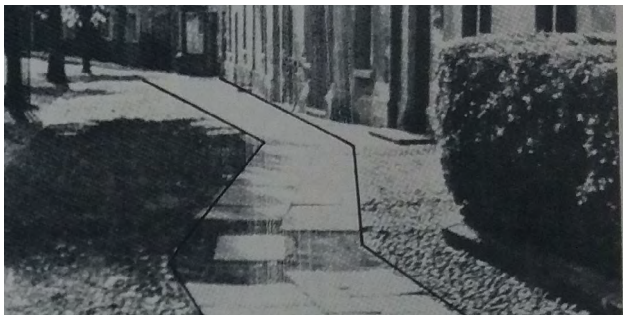


Figura A.05: El diseño del pavimento ayuda a leer los espacios urbanos (Lopera, 1986)

y en cierta medida dificultan la circulación. Hace hincapié en la textura como un medio de lectura del espacio urbano. Esta distinción que propone en el diseño de espacios urbanos pone en relación los pavimentos con las ideas que Jan Gehl expone en su libro "Ciudades para la Gente", en que estudia de forma sistemática los distintos usos del espacio público, y pone en duda la calle como un espacio solo de circulación. Es posible que determinar una "jerarquía" visual y tectónica de espacios menos y más transitables pudiera crear espacios para pararse en vez de para circular. El pavimento se configura como una guía intuitiva para realizar distintos usos y aumentar la diversidad y calidad del espacio público.

Por otra parte, la accesibilidad es cada vez más un elemento imprescindible para el diseño urbano, por lo que es necesario reflexionar en qué medida esta división de texturas puede afectar a la movilidad.

Finalmente, la mejora del clima puede ser garante de otra forma de accesibilidad. El establecimiento de espacios con un clima adecuado favorece la calidad del espacio público y el acceso a ellos de las personas más vulnerables.

Sistema de identidad

Por otra parte, es necesario comprender los pavimentos como la quinta fachada de las ciudades y de los espacios públicos. Las ordenanzas sobre el decoro y adecuación de los edificios, aplicadas generalmente en los cascos urbanos, buscan promover la conservación de los elementos patrimoniales. Sin embargo, los pavimentos parecen responder exclusivamente a criterios estructurales -estabilidad y resistencia frente al tráfico rodado- e ignoran factores ambientales, de interacción con los edificios presentes, culturales y estéticos, salvo en contadas excepciones.

Algunas ciudades -Lisboa, Oporto, Roma, Paris- deben su identidad, en parte, al pavimento. Si bien en algunos casos las poblaciones locales pueden quejarse del uso de adoquines flexibles (ej: los *sampietrini* en Roma), éstos las hacen inmediatamente reconocibles. ¿Qué sería de Roma sin los *sampietrini* y las *"malas" hierbas*?

Pavimentos convencionales en Madrid

Madrid no parece pertenecer a esas ciudades "conocidas por su pavimento" y suele modificar el tipo de pavimento según la calle, el área, o incluso el barrio. En ella quedan enterrados los antiguos "adoquines madrileños" .

En general, las aceras y las calzadas de Madrid -convencionales- se componen en general de tres capas: capa de rodadura, base de hormigón y subbase granular, sobre una base de suelo previamente compactado. Este sistema de pavimentado impermeabiliza casi por completo el suelo y tiene grandes efectos en el balance hídrico, en la temperatura, en la gestión de contaminantes, y en el desarrollo de vegetación *(ver apartado sobre efectos del sellado de suelos)*.

Respecto del uso, es relevante comentar la proliferación de terrazas en Madrid en los últimos años, denunciado -entre otros- por la asociación de viandantes A Pié. Esto pone de manifiesto un problema creciente relacionado con la gestión del espacio público en Madrid, del que no trata este documento.

El centro urbano se constituye en un "negativo" del suelo natural donde la mayoría de superficies están absolutamente selladas, y a esta área se le restan parcelas de parques o alcorques. Mientras, algunas zonas más alejadas del centro tienen una mayor área de "suelo sin sellar". Aluche, la Alameda de Osuna, la Estrella, son algunos ejemplos.

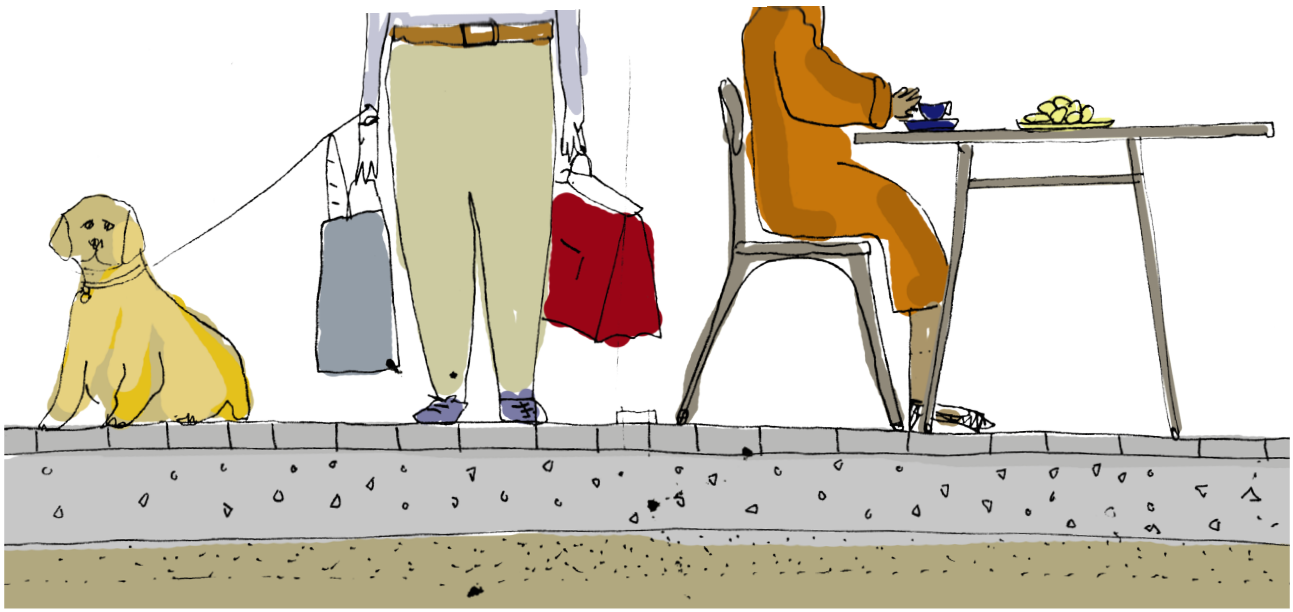


Figura A.06: Pavimento convencional en Madrid

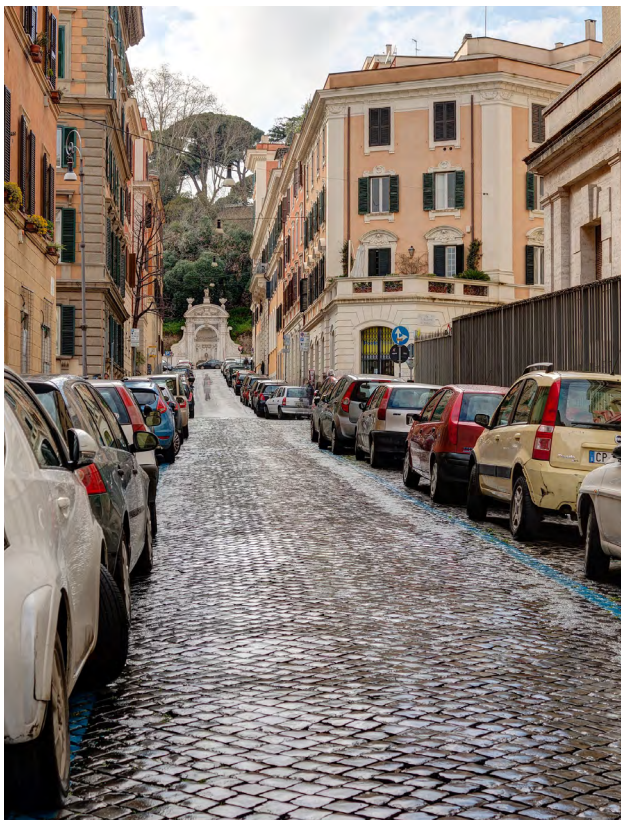


Figura A.07-08: Algunas ciudades o regiones europeas pueden identificarse facilmente por su pavimento. Primera foto: Roma: Via Luciano Manara Trastevere. Roma Fuente: Joadl -WikipediaCommons-
segunda: Santarém, Portugal por E. Rauc h).

Objetivos y límites del proyecto

¿Es posible revertir esta tendencia y mantener ciertas actividades que no impliquen la pavimentación dura, el sellado de suelos?

En este contexto, la Ordenanza de Gestión y Uso Eficiente del Agua en la Ciudad de Madrid requiere invertir esta tendencia al introducir al menos un 20% de pavimentos permeables en nuevas áreas urbanas. "Tienen la consideración de superficies permeables, entre otros, los pavimentos porosos como gravas, arenas y materiales cerámicos porosos. La instalación de losetas, empedrados o adoquines ejecutados con juntas de material permeable tendrán también dicha consideración."

Esta ordenanza puede suponer una oportunidad para repensar la identidad de la ciudad a través de los pavimentos.

Sin embargo, esta normativa incluye en el grupo "pavimento permeable" indistintamente pavimentos directamente apoyados sobre suelos compactados y pavimentos permeables -sobre una capa de grava, y parece existir cierta confusión en torno al uso de los mismos, sin comprender qué beneficios puede aportar cada sistema de pavimentación.

Este documento no tiene la ambición de elegir un sistema de pavimento para Madrid, sino la de establecer algunos criterios básicos de comprensión de los beneficios y problemas de los distintos tipos de pavimentos que no suponen un sellado total del suelo, y poder servir a modo de consulta para el diseñador de espacios urbanos.

Los pavimentos que no sellan por completo el suelo permiten la circulación de aire y agua a través de los suelos urbanos de una forma más intensa que las superficies impermeables. Por ello en un primer momento es necesario conocer los suelos urbanos.

Características principales

Los suelos urbanos son esencialmente distintos a los suelos agrícolas o naturales (Pavao-Zuckermann, 2008). Burghardt (1994) los define como **"suelos en áreas urbanas y periurbanas que consisten en depósitos antrópicos y materiales de origen tecnológico, formados y modificados por el corte, el relleno, la mezcla, la intrusión de gases y líquidos, el sellado y la contaminación".**

Se caracterizan por una gran heterogeneidad y por una fuerte influencia del ser humano en su construcción y desarrollo.

Variabilidad

Variabilidad vertical

En los suelos urbanos se encuentran construcciones subterráneas, redes de instalaciones urbanas, túneles y pasadizos (Forman, 2014). También es probable encontrar restos de otras ciudades, traslocaciones, depósitos y rellenos. Los horizontes suelen estar modificados e incluso 'desaparecidos' (Meuser, 2010).

Variabilidad horizontal

La variabilidad también se produce en el plano horizontal. Estos suelos tienen diversos parches en un mismo `horizonte´, que presentan una mayor diversidad que un suelo natural (Forman, 2014).

Influencia del modelo de ciudad

Las propiedades específicas de los suelos urbanos dependen del tipo de tejido urbano y de cómo el medio urbano interactúa con el medio y el clima local. Modelos de ciudad diferente afectan a los ecosistemas -y por tanto a los suelos- de formas distintas. La densidad urbana, la economía, la organización política, la movilidad, y el diseño influyen en la formación de suelos urbanos (Pavao-Zuckermann, 2008).

La urbanización tiene efectos distintos en los parámetros estudiados, unos varían respecto de ella y otros no. El pH no varía en función del tamaño de las ciudades, sino por otros factores, mientras que la tasa de mineralización y la diferencia de temperatura sí que parecen aumentar con la escala (Meuser, 2010).

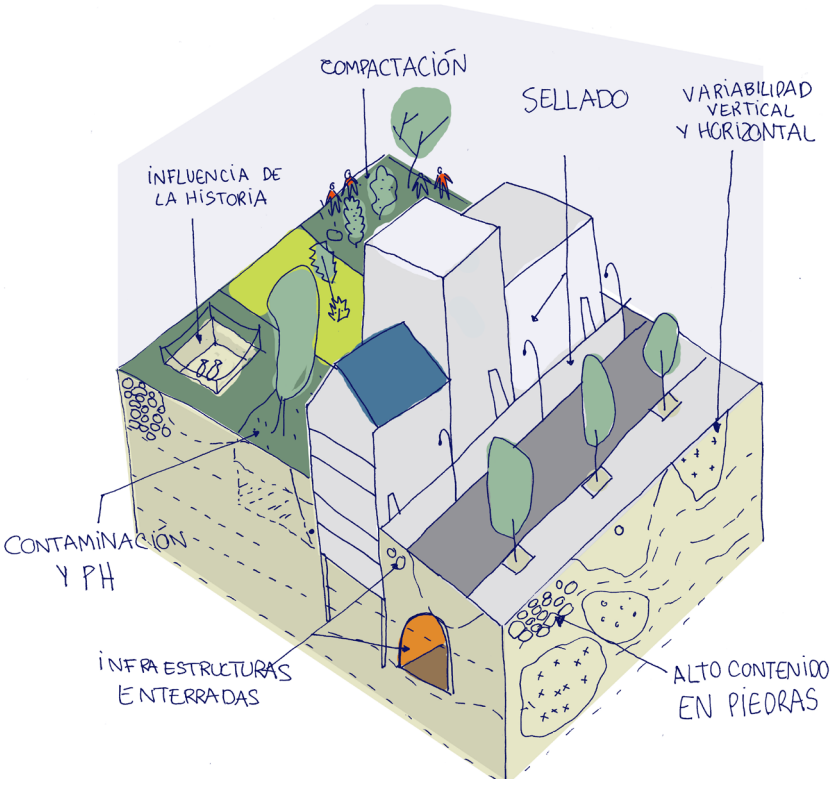


Figura A.09: Características principales de suelos urbanos. Adaptado según imagen de Forman, 2014).

Figura A.10: El crecimiento urbanístico contribuye al sellado de suelos.
Foto: Google maps- selección: Nación Rotonda - San Sebastián de los Reyes.

Influencia de la historia

Los procesos de urbanización intensiva comenzaron en el norte de Europa con la Revolución Industrial, y continúan a lo largo de los siglos XX y XXI. Estos procesos estuvieron ligados al fuerte desarrollo de la industria, que generalmente se desarrollaba muy próxima o en el interior de núcleos urbanos. Este desarrollo conllevó procesos intensos de contaminación y tuvo como resultado la consideración de las ciudades como insalubres. Por ello, a principios del siglo XX se propusieron modelos de ciudad alejados de la contaminación como la Ciudad Jardín - que a su vez fomentaron el consumo de suelo. Por otra parte, el Movimiento Moderno propuso la separación de usos como garante de las ciudades salubres, potenciando las redes de transporte entre las áreas productivas y las residenciales, y desarrollando la industria del automóvil, que, a su vez, es responsable de buena parte de la contaminación en las ciudades. Todos estos procesos marcaron su impacto y participaron de la construcción de distintos suelos urbanos, mediante depósitos, construcciones, residuos de obras, etc. (Meuser, 2010)

Esta breve historia de las ciudades muestra la complejidad urbana y como ésta puede tener una gran influencia en los suelos.

Se suele asociar una alta contaminación a lugares que tienen usos desde hace largo tiempo. Sin embargo, el siglo XX es uno de los momentos históricos en que los procesos de industrialización -y con ella de contaminación- han sido más intensos.

En la actualidad, algunas áreas están sumidas en procesos de “desurbanización” y son conocidas como *shrinking cities*, incluyendo áreas de *brownfields*, siendo origen de contaminantes por la degradación de materiales de edificación y urbanización de origen antrópico.

Influencia de la posición relativa dentro de las ciudades

El tipo de tejido dentro de una misma ciudad tiene una gran influencia en la formación del suelo. Los centros históricos, los centros urbanos, las áreas periurbanas, las ciudades-dormitorio, las zonas industriales y los bordes de infraestructuras de transporte muestran tasas de contaminantes muy distintas entre sí. (Meuser, 2010)

Sellado y compactación

En lo que se refiere a pavimentos, el sellado y la compactación son los dos elementos más característicos.

Sellado de suelos

Sellado: la acción de cubrir el suelo mediante un material impermeable. Es una de las mayores causas de degradación de suelos en la Unión Europea (Comisión Europea). Afecta -en general- a terrenos agrícolas, disminuye la biodiversidad, contribuye al cambio climático, y aumenta el riesgo de inundaciones y la escasez de agua. Desde mediados de los años 50 la superficie total de área de las ciudades de la Unión Europea ha aumentado un 78%, mientras que la población ha crecido un

33% (Comisión Europea). Las superficies pavimentadas representan entre 1/2 y 2/3 de las ciudades por lo que su comportamiento frente al agua tiene una gran importancia en el balance hídrico global (Ferguson, 2005). El sellado de suelos en espacios abiertos ha sido una tendencia en los últimos 50 años en gran parte de las ciudades europeas, en pro de la circulación de vehículos y de la disminución de los costes de mantenimiento. El sellado de suelos es un problema ambiental que se ha estudiado de forma desigual en el mundo. En particular, en Alemania se han realizado numerosos estudios y se han tomado medidas concretas, mientras que en España se tienen pocos datos sobre este fenómeno. Sin embargo, no es solamente una "mala práctica": si en una ciudad los contaminantes superan la capacidad filtrante y de resistir los cambios del pH de un suelo, el agua y el subsuelo pueden verse seriamente afectados (Wessolek, 2005; Meuser, 2010). En consecuencia, en algunos casos, las áreas selladas pueden ser una medida de protección de los acuíferos subterráneos y del suelo.

Por el contrario, un área sellada pierde todas las funciones propias de un suelo, y en particular la infiltración de agua. En superficies urbanas impermeables, la escorrentía es del 95% (Starke, 2010 citando a Schueler, 1994). Este agua, si colapsa las redes de saneamiento convencionales en periodos de lluvias intensas -estanques de tormenta, etc.-, puede "desplazar" la contaminación directamente a los ríos.

Frente a esta situación, se han ido tomando medidas en algunas ciudades. Una de las más relevantes se puso en práctica en Alemania en 1996, donde se obligó a los propietarios de suelos privados a infiltrar todo agua de lluvia que llegase a su terreno o a conectarlo con redes hídricas existentes. En Madrid se obliga a que un 20% de los pavimentos sean permeables, incluyendo en este porcentaje los pavimentos apoyados sobre cama de arena (Ordenanza de Gestión y Uso Eficiente del Agua en la Ciudad de Madrid) .

Compactación de suelos

La compactación de suelos ocurre cuando las partículas del suelo se oprimen las unas contra las otras, reduciendo el espacio poroso. Esto aumenta la densidad del suelo. Sucede como respuesta a la presión ejercida por maquinaria, animales o personas. Elimina la estructura presente en las capas superficiales de los suelos. La compactación limita el desarrollo radicular, lo cual tiene efecto en la cantidad de agua y nutrientes que toman las plantas. Disminuye tanto la actividad de los organismos del suelo -al ralentizar la descomposición de materia orgánica-, como limita la infiltración y aumenta la escorrentía, amplificando la erosión hídrica (Meuser, 2010).

Presencia de infraestructuras enterradas

En las ciudades, y sobre todo en los centros urbanos, cabe destacar la cantidad de infraestructuras enterradas que modifican la estructura del suelo: metro, pasajes, aparcamientos, redes de infraestructuras, etc.

Contaminación y pH

Las características biogeoquímicas de los suelos urbanos son también esencialmente distintas que las de los suelos naturales o agrícolas y están fuertemente mediados por las actividades urbanas. (Meuser, 2010)

En algunos casos el pH puede ser mas ácido por las lluvias ácidas, sin embargo por lo general no existe ninguna norma específica de cada ciudad o área estudiada (Meuser, 2010).

A continuación se desarrollan los posibles orígenes de la contaminación capaces de afectar o interactuar con pavimentos.

Contaminación existente en el suelo

Se produce en gran parte de superficies de la ciudad. Los lugares donde se encuentra en la actualidad son absolutamente difusos y/o indeterminados. Hasta hace poco tiempo, el suelo ha sido sistemáticamente olvidado en la gestión medioambiental de las ciudades. Por ejemplo en Madrid, hasta el momento no existe cartografía de sellado de suelos.

Sustratos técnicos

Las ciudades tienen horizontes o sustratos de origen técnico. Existen muchos tipos de sustratos técnicos: escombros de construcción, las escorias de altos hornos, cenizas, deshechos domésticos o de minas o lodos, entre otros. Estos sustratos suelen tener características en común, como el alto

contenido de fracciones "grandes", y la baja actividad biológica. Sin embargo en algunos casos ésta puede aumentar con el tiempo (Meuser, 2010).

Los niveles de contaminación en estos suelos dependen de los materiales y de la textura, así como del tipo de sustrato. Cabe destacar la influencia de las guerras pasadas en la contaminación de las ciudades, y la posible presencia de plomo en lugares donde ha habido frentes de las guerras.

Contaminación extensiva

Estas construcciones artificiales enterradas pueden ser tanto foco de contaminantes —ejemplo: escapes de gas—, como vehículo para los mismos.

Depósitos de polvo
Proviene de las emisiones de la instalaciones de distintos edificios, vehículos, y elementos que emiten partículas que quedan suspendidas en el aire (Meuser, 2010). Están por tanto intrínsecamente relacionados con la contaminación del aire.

Ambiente seco: El polvo se crea en condiciones de sequía por lo que es particularmente extremo en climas áridos y semiáridos, pero también en ciudades con gran actividad. Esta forma de contaminación también accede al interior de las viviendas. Consiste en la sedimentación de polvo, aerosoles y gas de la atmósfera. Las partículas de mayor densidad caen al suelo; aquellas con menor densidad se mantienen en suspensión o suben a estratos superiores. Una parte se “limpia” con las lluvias y se introduce en las aguas de escorrentía y en el suelo con el “*first flush*” -primera lluvia después de un periodo seco.

Ambiente húmedo: Las partículas que flotan en el aire se depositan en el suelo, "arrastradas" por el agua. Las lluvias, nieves, nieblas, el rocío o las heladas conllevan este tipo de procesos. El agua de lluvia contiene sulfatos, cloruros, amonio, óxidos de azufre, óxidos de nitrogeno y metales pesados entre otros. Los cloruros que provienen de la combustión acidifican la lluvia. También existen “macrocontaminantes” como pueden ser los restos de hojas, el polen, etc. (Meuser, 2010).

Materiales de construcción
De la misma forma que los materiales de construcción pueden ser origen de contaminantes en el suelo, también lo son cuando están en uso. Las pinturas de las fachadas, los materiales bituminosos expuestos y los tejados de zinc son sólo algunos ejemplos de contaminantes potenciales. Cuando el agua de escorrentía discurre por ellos y va a parar a los suelos, de forma continuada, se pueden producir altos niveles de contaminación (Göbel

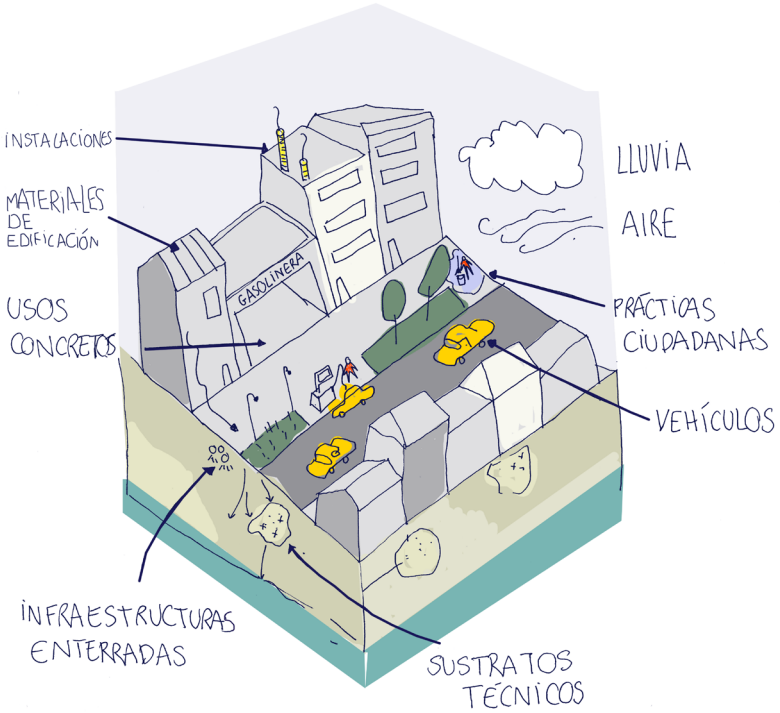


Figura A.11: Posibles orígenes de la contaminación del suelo en núcleos urbanos.

et al., 2007). Los lugares abandonados y las zonas en obras suelen ser un origen de contaminantes en las áreas urbanas. Se potencian procesos de erosión hídrica y eólica, se acumulan materiales. Los llamados *brownfields* suelen generar una gran cantidad de problemas ambientales: la corrosión, los derrames y vertidos, la presencia de sustancias peligrosas sin mantenimiento ni supervisión, etc.

Prácticas ciudadanas
El comportamiento y las costumbres de los habitantes pueden tener una gran repercusión en la contaminación de los suelos. En Madrid resulta particularmente sorprendente la posible contaminación de los alcorques por vertidos de lejía o amoniaco, así como la contaminación por bacterias *E. Coli*, que provienen de las heces de animales domésticos.

Contaminación lineal

Se produce en el entorno de las infraestructuras, sobre todo con mucha intensidad de tráfico.

Vías de transporte Ligada con la sedimentación de metales pesados y contaminantes orgánicos. Antiguamente, en lo que respecta a vías de tráfico rodado el plomo era un fuerte contaminante, por lo que se prohibió. Proviene de la combustión o de otras partes de los vehículos. Las vías de tren y otras infraestructuras también pueden producir contaminación lineal.

Infraestructuras enterradas Bajo las calles, carreteras y edificios, existen muchas tuberías y redes -riego, saneamiento, gas, agua fría y caliente, cables, telecomunicaciones. Pueden ser tanto focos de contaminación como ofrecer vías para el desplazamiento de contaminantes.

La contaminación difusa es un grave problema de las ciudades al producirse por la suma de muchas acciones. El agua de escorrentía, que puede llegar o bien a las redes de saneamiento, o bien a superficies permeables, es una buena muestra de qué forma pueden observarse o repartirse los contaminantes en las ciudades.

Contaminación ligada a un uso específico

Este documento trata las áreas pavimentadas de forma extensa, por lo que las actividades potencialmente contaminantes o los contaminantes específicos no se tratan en detalle. En general los pavimentos sellados son una forma de evitar la contaminación del subsuelo, y el uso de pavimentos parcialmente permeables suele estar prohibido en áreas donde existe contaminación específica.

Una excepción a ésto son los herbicidas en las zonas cercanas a los parques o en las aceras o alcorques para limitar las malas hierbas.

Herbicidas, plaguicidas, pesticidas
Aunque recientemente en Madrid se ha limitado el uso de glifosato, el uso de herbicidas para eliminar las malas hierbas que pueden acumularse en las juntas de los distintos tipos de pavimentos es una práctica común, así como el uso de plaguicidas y pesticidas. Existen muchos tipos según el elemento a degradar y según su comportamiento -que depende en gran medida de su solubilidad, su persistencia, su capacidad de disociación, su liposolubilidad, su volatilización, sus interacciones con el suelo y sus características ambientales. Si éstos no se descomponen de forma orgánica, no se filtran ni se descomponen, pueden ser peligrosos para la calidad del agua en el subsuelo.

Estuctura pedregosa

En las ciudades se suelen realizar o verter todo tipo de sustratos técnicos que por lo general tienen una gran proporción de “piedras” naturales o artificiales (Meuser, 2010; Wessolek, 2005). Esta es una característica muy importante de los suelos en entornos urbanos.

Efectos del sellado y la compactación de suelos

Existe una gran cantidad de literatura en torno al sellado y la compactación del suelo. Los pavimentos sellan parcial o totalmente el suelo y, de forma general, los compactan. También lo hace la construcción de edificios o estructuras. La pavimentación es, sin embargo, imprescindible para permitir un uso intensivo en los entornos urbanos y para evitar la contaminación de las ciudades. Sin embargo, no todos los sistemas de pavimentación tienen los mismos efectos sobre el medio ambiente.
En este apartado se resumen los principales efectos del sellado y de la compactación.

Distintos estudios (Wessolek, 2005; AGU, 1988) establecen una forma de "grado de sellado" asociada a cada tipo de superficie o de pavimento.

En este sentido, asumen y concluyen que ningún pavimento es comparable a un suelo natural desde el punto de vista de los servicios ecosistémicos, y que todos los pavimentos alternativos al sellado son parcialmente mejores que las superficies impermeables y peores que los suelos naturales o "pristinos".

Consecuencias del sellado de suelos

Balance hídrico

-aumento de la escorrentía
-disminución de la infiltración
-reducción de la evapotranspiración

Microclima

-reducción de la velocidad del aire
-reducción de la humedad del aire
-reducción de la ventilación
-aumento de la temperatura del aire

Biotopos

-pérdida de áreas de vegetación
-reducción de la cantidad de especies de flora y fauna
-fragmentación de hábitats
-desarrollo de especies termófilas

Figura A.11: Efectos del sellado de suelos -Según Wessolek (2005), citando a Muth (1996).

Efectos sobre el balance hídrico

Las consecuecias sobre el balance hídrico son numerosas. La figura A.13 presenta para el clima de Munster (Alemania), la evolución de la evaporación, la escorrentía y la infiltración según el grado de pavimentación.

Se observa como la escorrentía aumenta de entre un 0 a 8% hasta un 70%. La evapotranspiración disminuye de un 60% a un 20%, y la cantidad de agua para la recarga de acuíferos disminuye desde un 20-40% a un 5%.

Aunque no exista un análisis similar para el clima y el contexto urbano de Madrid, se puede aventurar que puede ser similar o mayor. Este concepto se resume en la figura A.12, donde se puede ver que la evaporación disminuye significativamente y la escorrentía aumenta de forma abrupta.

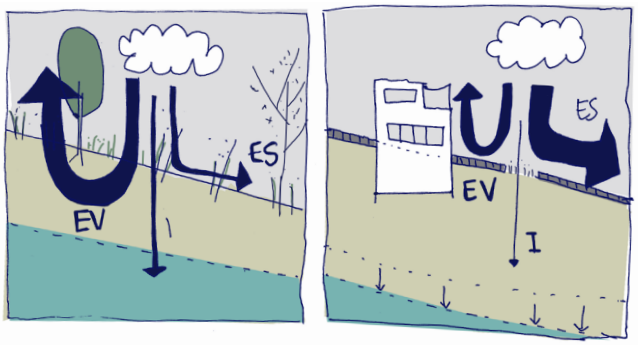


Figura A.12: Relación entre sellado se suelos, y balance hídrico (EV evaporacón, ES escorrentía y I recarga de acuíferos) y nivel freático. adapatación de dibujo de Göbel et al., 2004)

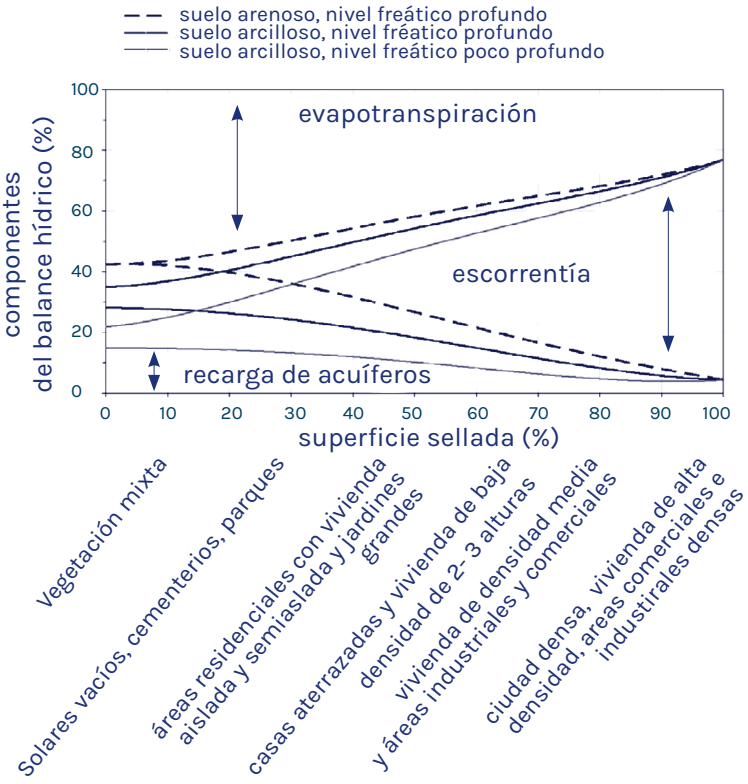


Figura A.13: Relación entre el grado de sellado y el balance hidríco (evapotranspiración, escorrentía, y recarga de acuíferos bajo varios tipos de suelos. (elaborado a partir de Göbel et al. 2013)

El sellado de suelos tiene una gran influencia sobre el balance hídrico al reducir -si está compactado- o impedir totalmente el ascenso de agua por capilaridad.

De forma general, en una superficie sellada, la evaporación ocurre sólo en las horas posteriores al evento, mientras que en un espacio natural los efectos se pueden percibir durante varios días (Göbel et al., 2013).

Efectos sobre la temperatura

La evaporación no es sólo un proceso ligado al agua sino que también influye en la temperatura. La disminución de la evaporación y la acumulación de calor en las superficies urbanas, junto con la disminución de la velocidad del aire provocan un aumento de la temperatura del aire - conocido como el efecto `isla de calor´.

También se calientan las capas inferiores del suelo hasta una profundidad estimada de alrededor de 2 metros (Wessolek, 2005). Durante el día el pavimento y el suelo se calientan y durante la noche sueltan el calor, contribuyendo a la isla de calor urbana.

En el estudio de la isla de calor en relación con los pavimentos es necesario distinguir entre las escalas del clima. Generalmente se estudia el clima urbano como un cómputo global a escala de calle o zona; sin embargo, las superficies pavimentadas adquieren temperaturas asombrosamente altas, por lo que podríamos poner en evidencia un "nanoclima" que influye a los humanos en los pies y las piernas -creando una sensación de calor mucho mayor a la que existe en el aire.

Cuando llueve, las primeros milímetros de lluvia se evaporan para equilibrar la temperatura de la superficie con la temperatura del aire (Wessolek, 2005).

La compactación disminuye el ascenso de agua por capilaridad y en este sentido, disminuye la evaporación.

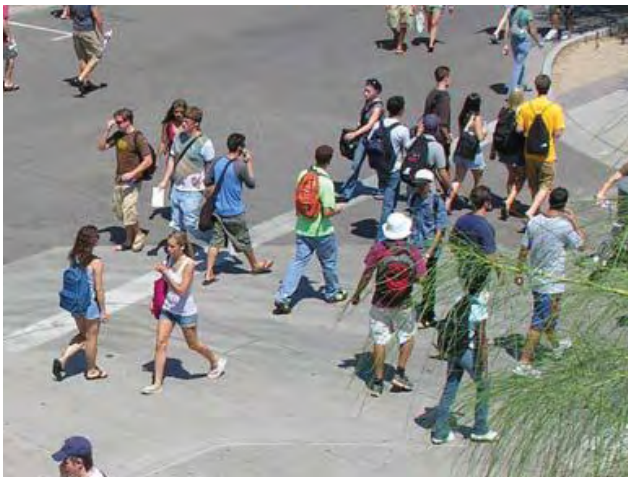


Figura A.14: Imagen de Fenix, Arizona, en verano donde los pavimentos pueden alcanzar temperaturas de 67ºC. United States. Environmental Protection Agency. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics. National Center of Excellence on SMART Innovations at Arizona State University

Efectos sobre la contaminación

En áreas selladas, los distintos contaminantes urbanos se acumulan sobre la superficie. Durante los periodos de lluvia intensa, y en particular en el *first flush* -primer evento de lluvia después de un periodo de sequía- los contaminantes se limpian y son arrastrados a la red de drenaje (Wessolek, 2005).

En áreas compactadas, una pequeña parte del agua se infiltra y con ella algunos contaminantes. Otra parte se degrada o se filtra en las juntas y la mayoría discurre por escorrentía.

Si el agua de escorrentía con una fuerte carga de contaminantes discurre hacia zonas que no están selladas y se concentra, se pueden dar procesos de contaminación.

Si la cantidad de contaminantes en el suelo supera la capacidad de filtración del suelo, no es posible asegurar la protección de los acuíferos de contaminantes tóxicos. En este caso, el sellado intencional del suelo debe contemplarse como una medida de protección del subsuelo (Wessolek, 2005; Meuser, 2010).

Efectos sobre la vegetación y la fauna

Comparando las zonas urbanas con las naturales, el sellado completo afecta a la fauna y a la flora mediante la destrucción de hábitats (Fig A.15), lo cual tiene efectos en cascada. El sellado contribuye a la fragmentación y al aislamiento de hábitats o zonas sin sellar (Wessolek 2005).

La compactación del suelo es responsable de la destrucción o del daño a la cobertura de áreas cercanas a áreas selladas - e impiden el desarrollo de vegetación y fauna en áreas selladas.

Estudiando el desarrollo de los árboles urbanos, se suele asumir que la pavimentación limita su crecimiento Sin embargo distintos estudios *(ver apartado de vegetación)* parecen demostrar que el crecimiento reducido de árboles está más

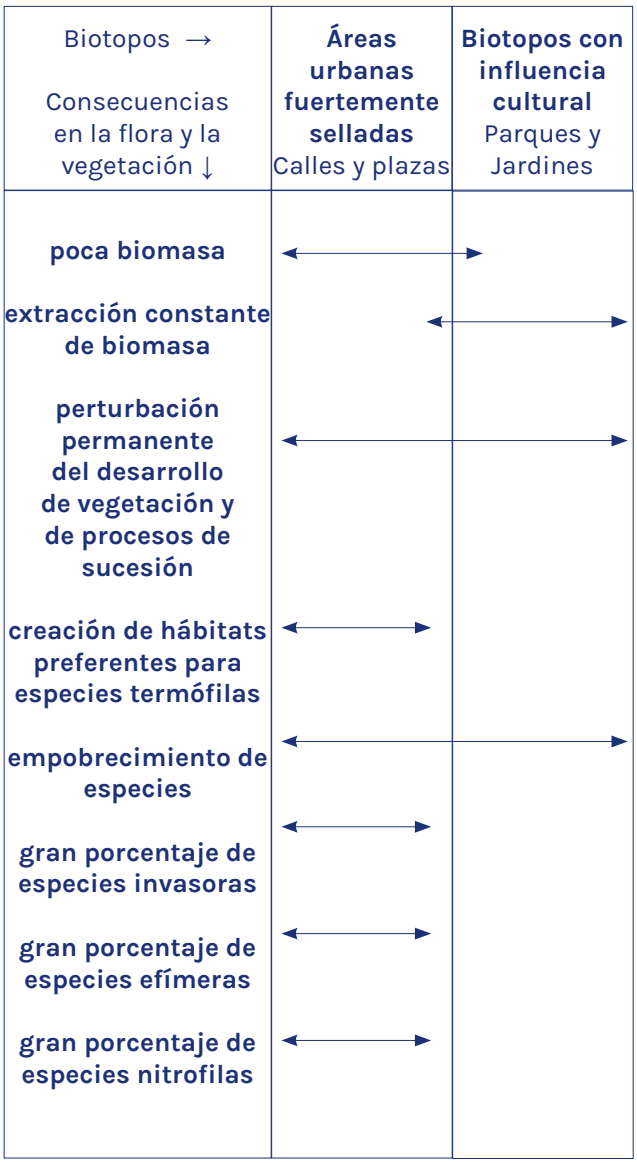


Figura A.15: Efectos del sellado sobre la biodiversidad. Adaptación del gráfico de Wessolek (2005)

ligado a la compactación, a la cantidad, a la calidad, y a la extremada saturación del suelo -contrariamente a lo que se suele asumir.

Conclusiones

Los efectos del sellado son múltiples y afectan gravemente a los ecosistemas urbanos y a los ecosistemas naturales cercanos a o conectados con la ciudad.

Objeto de estudio: Pavimentos alternativos al sellado completo

Pavimentos alternativos al sellado completo

Las áreas pavimentadas representan entre 1/2 y 2/3 de las ciudades (Ferguson, 2005) y esto supone que la pavimentación es una de las mayores responsables del sellado. Por esta razón, este estudio se concentra en pavimentos que no sellan por completo el suelo. Este proyecto caracteriza distintos tipos de pavimentos permeables al agua o al vapor y evalúa las cualidades y los límites de uso. Su objetivo es proporcionar un resumen del estado de la investigación sobre los efectos de distintos tipos de pavimentos en el ambiente urbano. Además en un contexto de Cambio Climático, es imprescindible conocer y trabajar con cuestiones climáticas el diseño urbano para mitigar sus efectos.

Actualmente, no existe una investigación sistemática en este campo para climas mediterráneos continentalizados como el de Madrid, por lo que se recomienda realizar estudios sistemáticos para verificar o ampliar los datos recopilados en este documento.

También, en distintos artículos no se especifican las condiciones concretas en que se realizan los ensayos por lo que puede haber grandes variaciones entre ensayos y resultados aparentemente contradictorios.

El conjunto de pavimentos estudiados se organiza en cuatro tipos genéricos, aquí citados: pavimentos permeables, pavimentos tradicionales, terrizos y alcorques.

Pavimentos permeables

Los pavimentos permeables están diseñados para infiltrar el agua de lluvia en el suelo, recogerla para otros usos o acumularla temporalmente antes de introducirla en la red de drenaje mejorando y ampliando su capacidad.

Pavimentos tradicionales

Los pavimentos tradicionales se caracterizan por, globalmente, estar directamente apoyados sobre una base de arena o arena y cal, o hincados en el suelo original. Su comportamiento bioclimático varía considerablemente según el tamaño de la pieza. Los llamamos tradicionales aunque algunos estudios los nombran "pavimentos permeables sin base". Nos referimos a ellos como tradicionales ya que tradicionalmente, este el es el pavimento que se ha ejecutado en las ciudades, y que aún se mantiene en algunos centros históricos. También, el concepto tradicional se refiere a la diversidad del tamaño de piezas y a la rugosidad. En cada estudio se evalúa que características es necesario tener en cuenta para evaluar las propiedades estudiadas.

Sin embargo, en algunos casos puede ser imposible distinguir "visualmente" un pavimento tradicional de uno permeable si los materiales de acabado son los mismos.

Terrizos

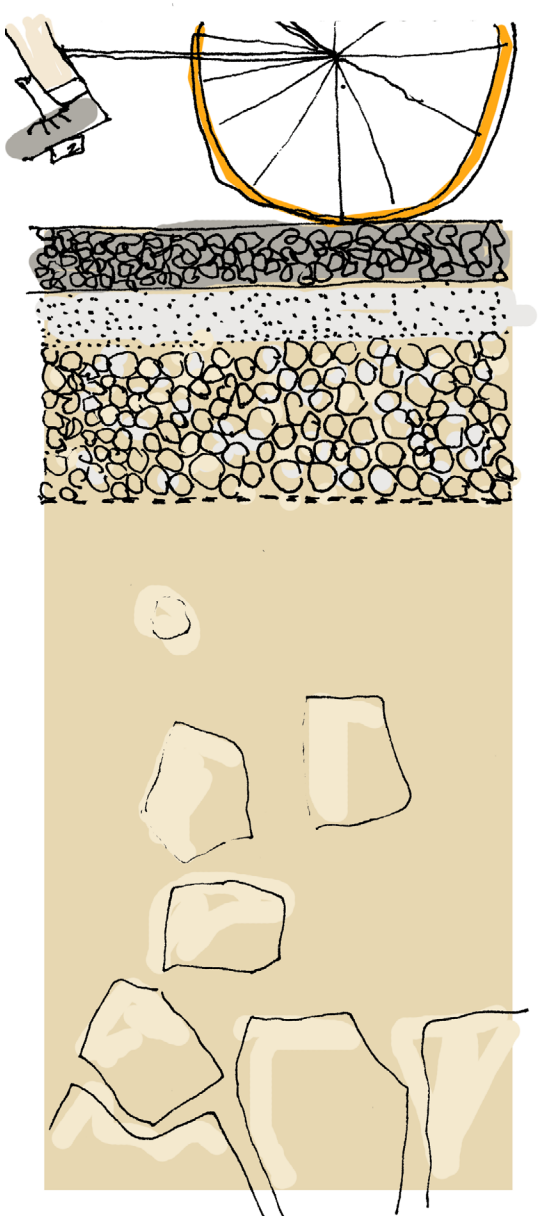
Los terrizos o "arenas" -*aggregates* en ingles- son básicamente distintas mezclas de arenas finas o gruesas con arcillas y limos, o incluso gravas, que se suelen utilizar en paseos o parques. Pueden estar construidos sobre una base granular. Según su granulometría su comportamiento difiere mucho.

Alcorques

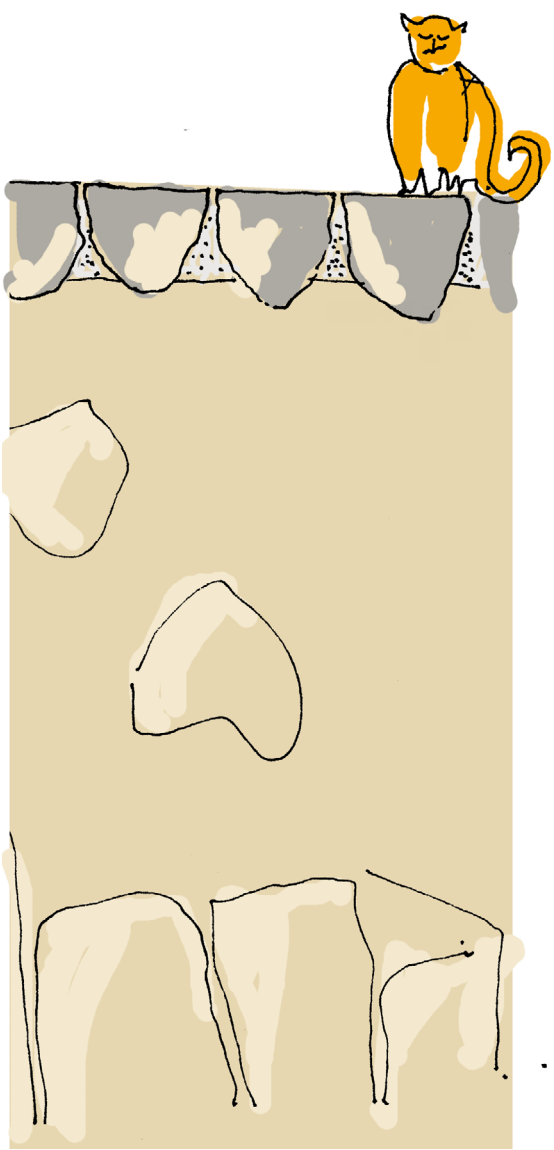
Finalmente, aunque los alcorques no son pavimentos, y son los únicas zonas que no se pisan -en teoría-, se incluyen en el estudio como una parte esencial de "espacio urbano", donde actualmente se concentra -en la medida de lo posible- la gran parte de la actividad biológica de los espacios urbanos, sin contar con los parques. No tienen por qué estar compactados y pueden estar cubiertos o no por vegetación.

Pavimentos o superficies objeto de estudio

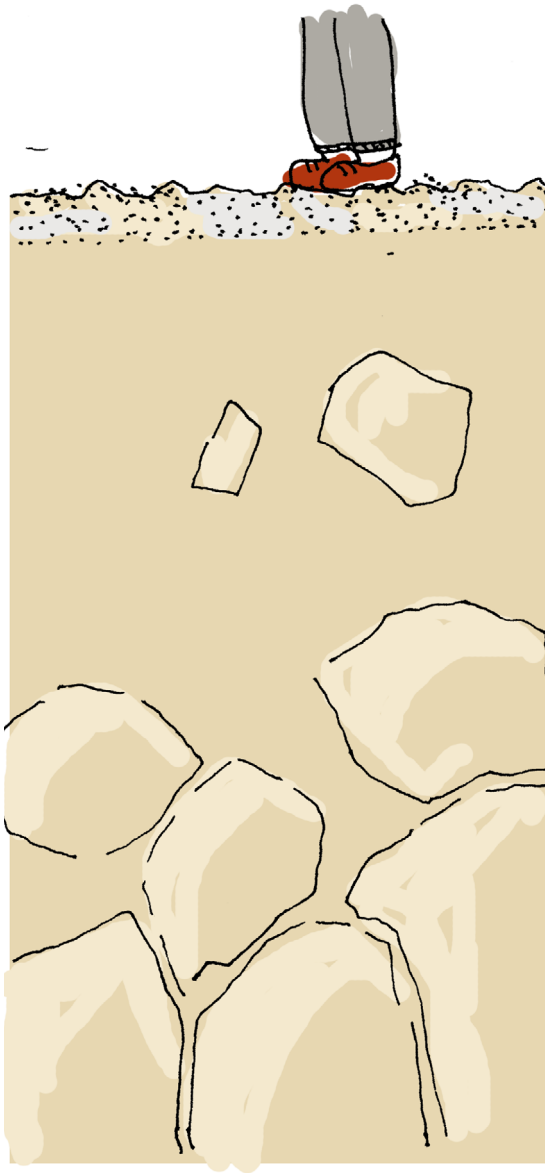
Pavimentos permeables -PP-



Pavimentos tradicionales -PT-



Terrizos



Alcorques

Construcción

Este apartado trata de definir los métodos de construcción de los distintos tipos de pavimentos o superficies estudiadas y pone en evidencia las particularidades de cada uno. Se intenta no limitarse a una descripción física sino recopilar y explicar las razones por las que se define cada elemento.

En algunos casos, como en los terrizos, no ha sido posible conocer "mezclas" de arenas, limos y arcillas adecuados para la realización de caminos. Marta Nieto (profesora de la Universidad de Alcalá de Henares) es una experta -paisajista que ha colaborado en la rehabilitación del Parque del Retiro y en El Capricho-.

Generalidades y aclaraciones

Este documento no es un catálogo de tipos de pavimentos o acabados. A través del estudio de algunos tipos se extraen propiedades que se pueden servir para el diseño urbano.

Generalmente, los pavimentos permeables, al ser sistemas normalizados, se realizan mediante piezas regulares y estandarizadas. Sin embargo, sería perfectamente posible introducir, como capas superficiales, piezas desiguales como por ejemplo: adoquines portugueses, siempre y cuanto la junta tuviera vegetación o gravas de 2 a 5 mm. Y viceversa, sería posible pensar en piezas estandarizadas para apoyar directamente sobre el terreno al modo de los pavimentos tradicionales.

Por otra parte, es importante distinguir entre dos tipos de bases granulares: las de los pavimentos permeables (PP) tienen por objetivo infiltrar agua en el suelo, mientras que las de los terrizos o las que se pueden encontrar bajo un suelo de adoquín tienen por objetivo dotar de una mayor resistencia a la carga.

Capacidad de carga y uso

Este trabajo no centra sus estudio en la capacidad de carga para cada tipo de pavimento. Sin embargo, es necesario comprender ideas básicas sobre la capacidad de carga de los pavimentos. Todos estos firmes son considerados "flexibles" -no tienen una base de hormigón. En este caso se cumple que cuanto mayor espesor más carga aguantan.

La creación de una subbase granular sirve, además de para infiltrar agua- en el caso de los PP-, para repartir las cargas superficiales, por eso podemos considerar que los pavimentos directamente apoyados sobre una base de arena o sobre suelos compactados resisten menos carga que los PP.
También por esta razón, en el caso de los adoquines madrileños que han existido en Madrid hasta hace 30 años, es posible decir que son capaces de aguantar cargas muy altas si estan correctamente ejecutados.

Según Antonio Lopera -doctor arquitecto por la ETSAM-, estos fueron eliminados por la contaminación acústica y esta misma propiedad podría convertirlos ahora en sistemas para disminuir la velocidad y la intensidad del tráfico (Lopera, 1986).

Al ser un "suelo roto", es irrompible y sus piezas pueden ser reutilizadas casi indefinidamente; además las reparaciones no dejan marcas ni juntas, no hace prácticamente ruido y no requieren de grandes maquinarias.

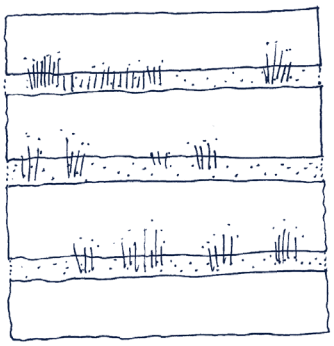
De forma general se puede considerar que:
-los PP permiten tener un tráfico ligero o medio. En los últimos años se están desarrollando sistemas que permitan tráfico intenso
-los PT pueden tener un uso sólo peatonal, excepto los grandes adoquines
-los terrizos, según si tienen o no una base granular pueden tener un tráfico ligero (ej: caminos rurales).

Clasificación

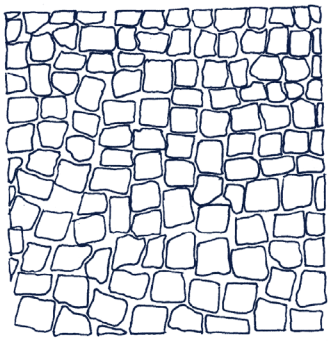
Lopera (1986) organiza los pavimentos que estudia en dos tipos: continuos y discontinuos.

Este sistema de clasificación se refiere al método en que se contruyen. Separa los pavimentos realizados con piezas de los ejecutados mediante el extendido de un material continuo. En el caso de los pavimentos estudiados en este documento es importante destacar que las propiedades de los continuos dependen del material del pavimento, mientras que en los discontinuos las propiedades estudiadas dependen -generalmente de las juntas.

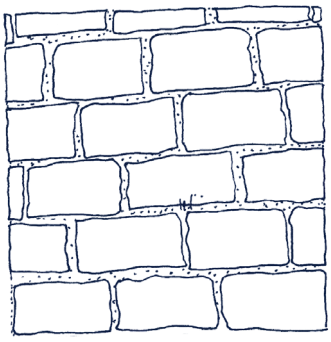
El volumen, la superficie, la disposición y el material de las juntas son las características de un suelo que definen los beneficios estudiados en este documento.



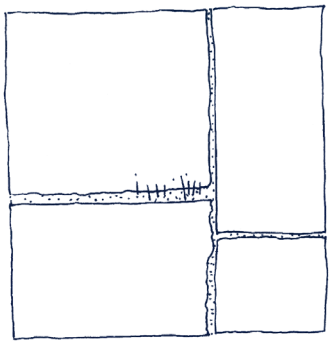
S_{juntas}=0,35m²/m²



S_{juntas}=0,27m²/m²



S_{juntas}=0,20m²/m²



S_{juntas}=0,05m²/m²

Figura A.15: Superficie de juntas según tipo de construcción

Porosidad

Es impresencidible comprender tanto la porosidad como los tipos de porosidad para poder comprender este documento.

En la Ordenanza de Gestión y Uso Eficiente del Agua en la Ciudad de Madrid se hace alusión a la porosidad o a la permeabilidad de un pavimento sin definir este concepto.

Porosidad: medida de espacios vacíos en un material o fracción del volumen de huecos sobre el volumen total de un material

La porosidad disminuye con la compactación del suelo. Los suelos arcillosos tienen mayor espacio poroso, pero si no tienen estructura ni vegetación, no permiten la infiltración de agua. Los suelos arenosos tienen poros mas grandes y el agua se infiltra rápidamente por gravedad hacia capas inferiores.

Además de la porosidad propia del suelo sobre el que se dispone el pavimento, es necesario tener en cuenta la porosidad del pavimento.

El tamaño de los poros determina la capacidad de un material para retener agua.

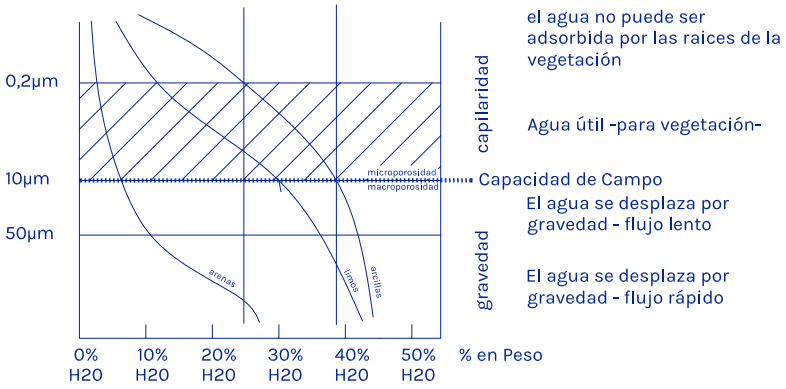
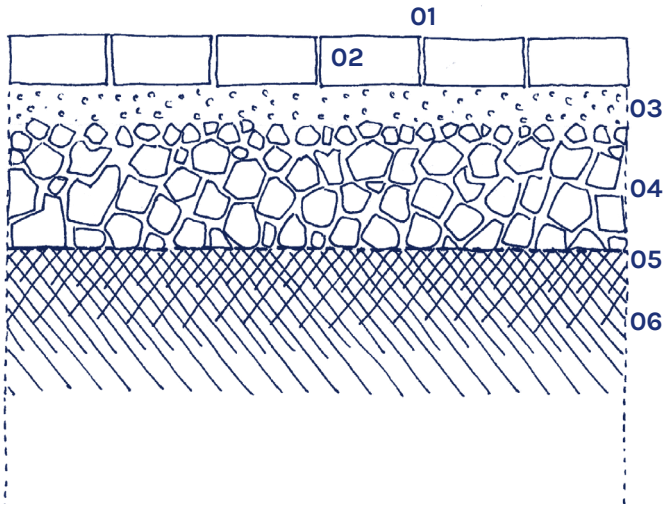


Figura A.16: Potencial capilar - comportamiento del agua según tamaño de los poros

Las superficies pavimentadas pueden tener poros grandes (>10 µm) que permiten que parte del agua discurra hacia los niveles inferiores del pavimento o poros pequeños (<10 µm) que permiten elevar el agua por capilaridad o retenerla para la vegetación o para hacer descender la temperatura (Figura A.16.) Los poros grandes pueden formarse, además de por la textura o estructura del suelo, por el desarrollo de vegetación. Esta característica modifica absolutamente el comportamiento de las superficies urbanas.

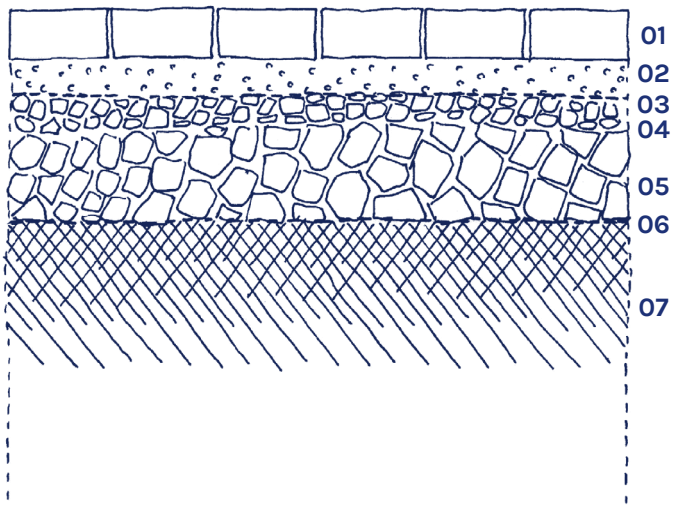
Los PP pueden tener exclusivamente poros grandes (juntas con gravas de 2 a 5mm o materiales porosos sin finos) o pequeños y grandes si incluyen vegetación sobre tierra vegetal en el diseño. Los PT, los terrizos y los alcorques pueden tener de los dos tipos.

Pavimentos permeables -PP-



Pavimentos permeables con juntas filtrantes

01 Pavimento de juntas filtrantes
02 Juntas filtrantes -gravas de 2 a 5 mm-
03 Base porosa -gravas de 2 a 5 mm- e= 30 mm
04 Subbase granular 20-63 mm (espesor según cantidad de agua que se desee infiltrar y precipitaciones)
05 Geotextil para evitar que la entrada de finos desde el suelo compactado
06 Suelo compactado* (*en general)



<u>Capas adicionales</u>: Los pavimentos permeables pueden tener mas capas que las indicadas anteriormente.

01 Pavimento superficial -con o sin juntas-
02 Base porosa -gravas de 2 a 5 mm- e=5 cm
03 Geotextil para que las arenas no bloqueen las gravas. Según Lucke et al. 2013 solo atrapa el 8% de las partículas por lo que su uso no es imprescindible
04 Subbase granular 01
05 Subbase granular 02 e=20 o 25 cm (según precipitación)
06 Geotextil para evitar que la entrada de finos desde el suelo compactado
07 Suelo compactado* (*en general)

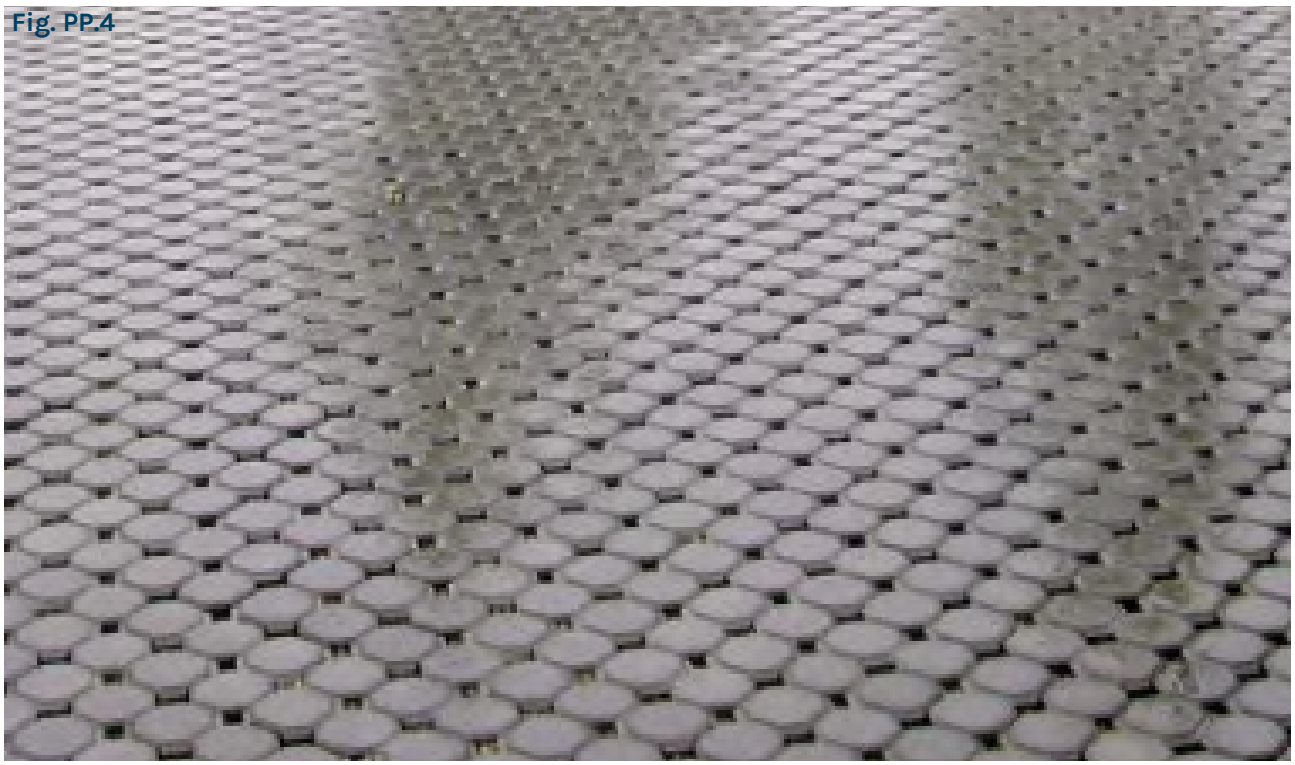
En estas imágenes se pueden ver ejemplos de PP con juntas o agujeros con gravas de 2 a 5 mm. En agunos casos es fácil distinguirlos de pavimentos de piezas apoyados directamente sobre el suelo. Existen muchas posibilidades de diseño.
Fig PP.1. Pavimento permeable de cerámica con huecos grandes filtrantes (Catálogo Flexibrick)
Fig PP.2. Pavimentos permeable de piezas de hormigón prefabricado con huecos grandes filtrantes
Fig PP.3. Pavimento permeable de piezas de hormigón prefabricado con juntas filtrantes
Fig PP.4. Pavimento permeable de piezas de hormigón prefabricado con huecos filtrantes.

Fig. PP.1

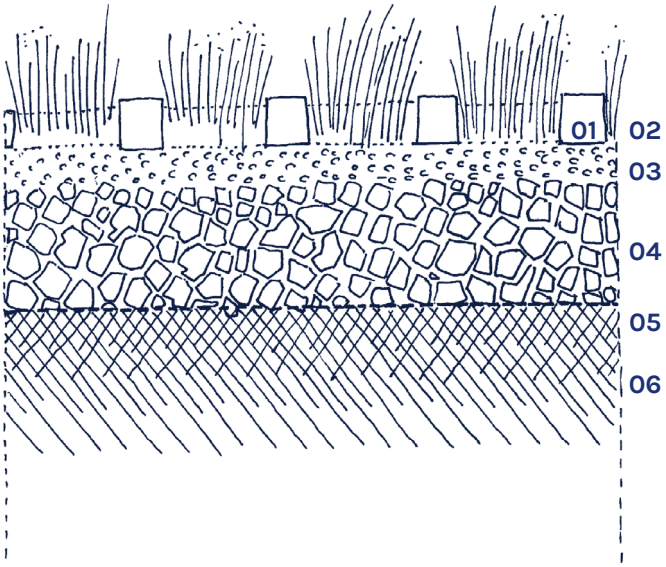
Fig. PP.2

Fig. PP.3

Fig. PP.4

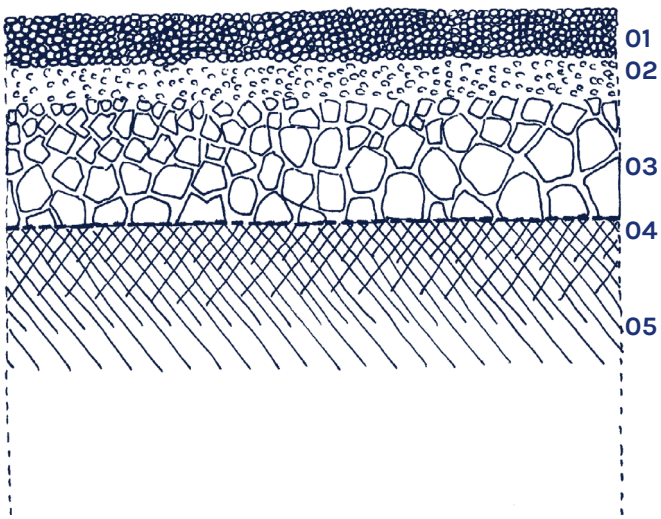


Pavimentos permeables -PP-



Pavimentos permeables con vegetación

01 Pavimento de hormigón o de plástico prefabricado
02 Topsoil o tierra vegetal semillado
03 Base porosa -gravas de 2 a 5 mm- e= 30 mm
04 Subbase granular 20-63 mm (espesor según cantidad de agua que se desee infiltrar y precipitaciones)
05 Geotextil para evitar que la entrada de finos desde el suelo compactado
06 Suelo compactado* (*en general)

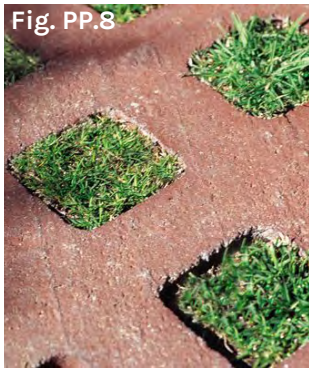


Pavimentos permeables porosos

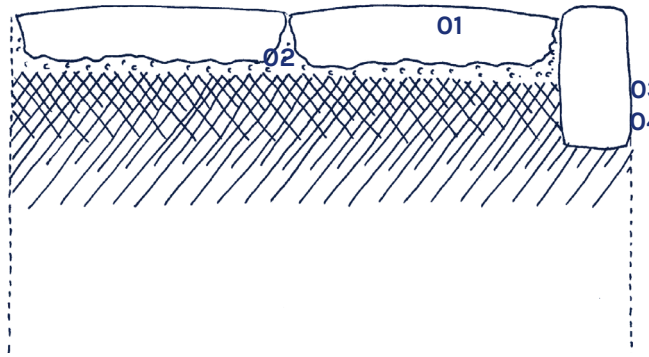
01 Pavimento de material poroso
02 Base porosa -gravas de 2 a 5 mm- e= 5 cm
03 Subbase granular 20-63 mm (espesor según cantidad de agua que se desee infiltrar y precipitaciones)
04 Geotextil para evitar que la entrada de finos desde el suelo compactado
05 Suelo compactado* (*en general)

Fig PP.5 Pavimento permeable con vegetación en la Passeig Sant Joan
Fig PP.6. Pavimentos con vegetación en el Museum of Modern and Contemporary Art, Seoul
Fig PP. 7 y 8 Pavimentos permeables con vegetación (detalles)
FIg PP.9 Hormigón poroso en comparación con otro impermeable. Autor: Manuel de Pazos Liaño -Ayuntamiento de Madrid-
Fig PP.10 Asfalto poroso y continuo. Autor: Manuel de Pazos Liaño -Ayuntamiento de Madrid-
Fig PP.11 Pavimento poroso de áridos con resinas poliméricas

Fig. PP.6

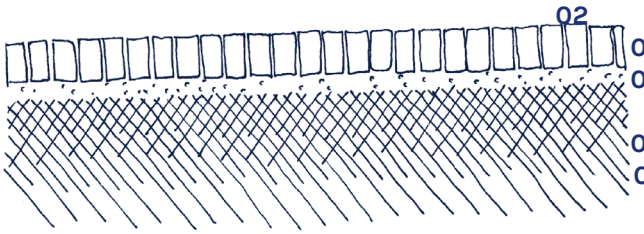


Pavimentos tradicionales -PT-



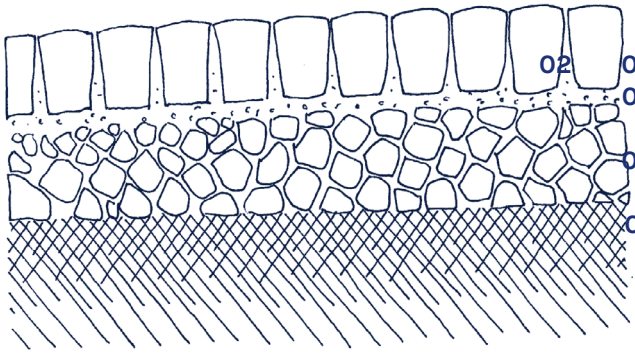
Enlosado

01 Losas (sin conglomerante). Labradas o lajas de piedra apenas debastadas, buscando aparejar los instersticios existentes
02 Juntas rellenas con arena
03 Lecho de arena
04 Suelo compactado
(Mileto y Vegas, 2017)



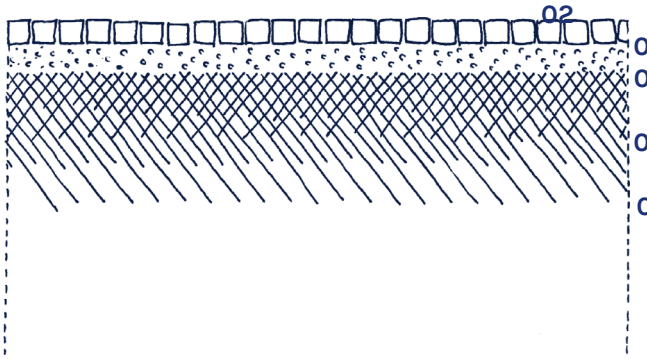
Solado de ladrillo (hipótesis)

01 Ladrillo cerámico macizo
02 Juntas de mortero de cal y arena
03 Base de mortero de cal y arena
04 Se desconoce si este pavimento incluye una subbase granular. Esta podría aumentar la resistencia y evitar el exceso de ascenso de agua por capilaridad.
05 Suelo compactado



Adoquín de granito (Terren, 2000)

01 Adoquines con cara abombada e=14cm
02 Juntas rellenas con arena
03 Lecho de arena e=5cm
e=25cm
04 Zahorra artificial e=25cm (opcional)
05 Suelo compactado



Adoquín portugués (Troitiño, TFM)

01 Adoquín tamaño normalizado 4/5cm o 5/7cm o 9/11cm o 12/13cm
02 Juntas rellenas con arenas finas Tamaño respectivamente, 0,5cm ó 0,5/1cm ó 0,5/1,5cm ó 0,5/2cm
03 Lecho de arena. Espesor respectivamente 4/7cm ó 7/10cm ó 10/15cm ó 10/15cm
04 Suelo compactado

Fig PT.1. Enlosado en granito. en la calle Pirineos
Fig PT.2 y PT. 3. *Sanpietrini* en Roma
Fig PT. 4. Adoquín portugués.

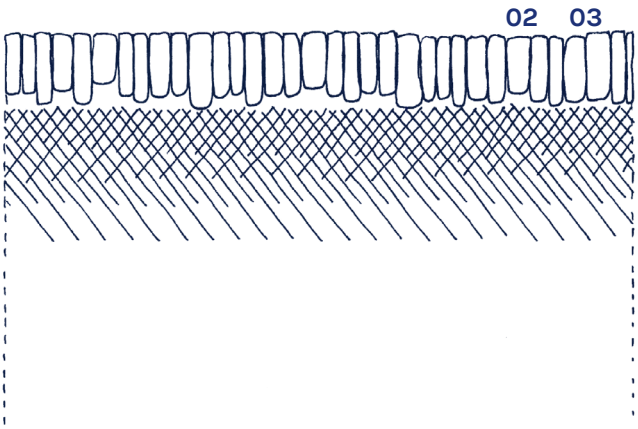
Fig. PT. 1

Fig. PT.2

Fig. PT. 3

Fig. PT. 4

Pavimentos tradicionales -PT-



Pavimento de guijarros (Vegas et al, 2015)

01 Guijarros hincados mediante mazas de goma para pavimentos: piezas maestras

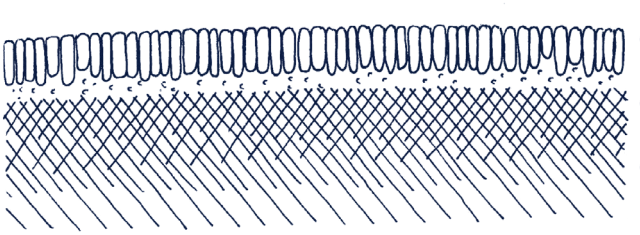
02 Guijarros hincados mediante mazas de goma para pavimentos: Piezas secundarias: cintas (mas pequeñas)

03 Guijarros hincados mediante mazas de goma para pavimentos de relleno

04 Juntas de mortero de cal hidráulica natural NHL3-5: vertido y barrido con cepillo de cerdas vegetales con regado pulverizado con una manguera para el fraguado

05 Lecho de mortero de arena y cal hidráulica NHL-5 proporción 4:1 para fijar y agarrar los guijarros que finalmente forman el pavimento. Espesor variable según guijarros.

06 Suelo compactado



Pavimento canto de morro (Ruiz Cabrero)

01 Cantos que van desde los 3 cm en su direccion mayor hasta los 8 cm colocados con un mazo de goma o de madera

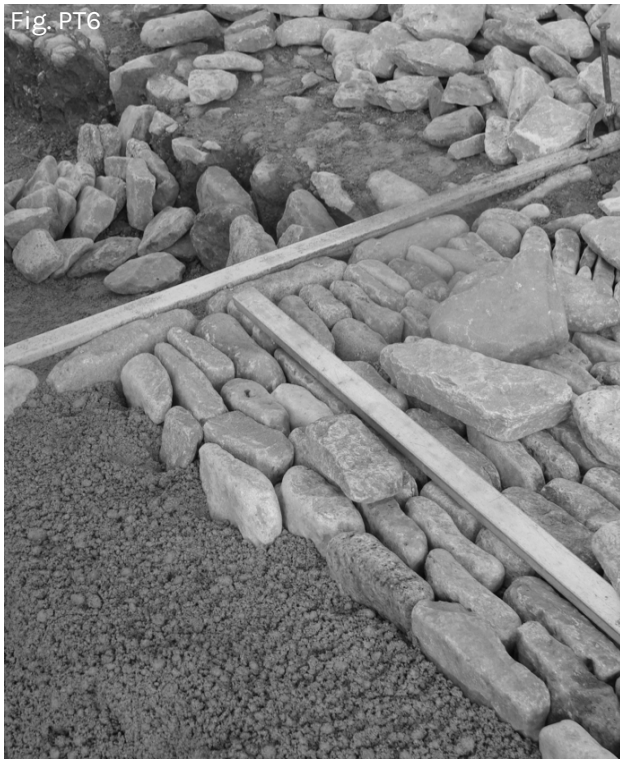
02 Lecho de arena con muy poca cal -regado al final de la ejecución del pavimento. Semillado para contribuir a la fijación del pavimento y para conseguir un prado en primavera

03 Perímetro rígido

04 Regado pulverizado con una manguera para el fraguado

05 Suelo compactado

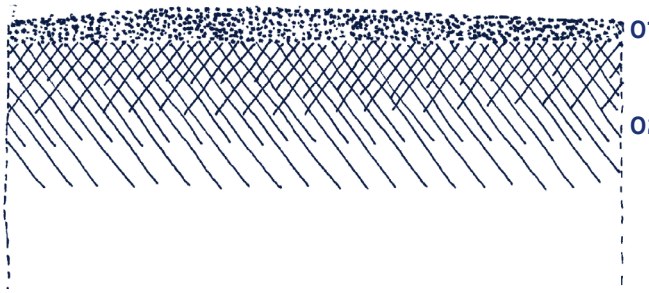
Fig PT.5. Colocación de guijarros en seco e hincado con la ayuda de una maceta de goma. (Vegas et al, 2015)
Fig PT.6 Nivelación de los guijarros. (Vegas et al, 2015)
Fig PT.7. Vertido y cepillado del mortero de cal rejuntado. (Vegas et al, 2015)
Fig PT.8 Pavimento de canto de morro en la mezquita de Córdoba.
FIg PT.9 Vegetación y musgo entre los cantos.



"Los pavimentos a los que te refieres en tu correo eran antes muy habituales en Córdoba e imagino que en toda España. Allí los llaman chino cordobés y en Castilla canto de morro. Ya sabes como son: cantos de morro dispuestos sobre un lecho de arena con muy poca cal, de tamaños que van desde los 3 cms. en su dirección mayor hasta los 8 cms. recibidos sin mortero y que se fijan por la propia tensión superficial pues están recogidos en superficies de perímetro rígido. Cuando una vez colocados, lo que se hace con mazo de madera o de goma, se riega el pavimento la poca cal de la base fragua ligeramente y los cantos quedan recibidos también por debajo. Pueden colocarse con todo tipo de dibujos, los que yo he restaurado (y continuo haciéndolo) en la Mezquita-Catedral siguen el esquema de espina de pez. Lo de las raíces que (...)te comentaba es una sutileza. Sucede que si se siembra cualquier hierba las raíces contribuyen a la fijación del pavimento que en principio se consigue sólo mediante la tensión superficial del conjunto. De todas maneras el principal motivo para sembrar hierba es conseguir que en primavera la solería parezca un prado. En ocasiones he visto este tipo de suelo recibido con mortero de cemento, a los albañiles les gusta porque es más rápido de colocación, pero quedan muy duros y lo que es más importante el suelo no drena, lo que si ocurre si el mortero es de cal y muy pobre. Además no florece en primevera."

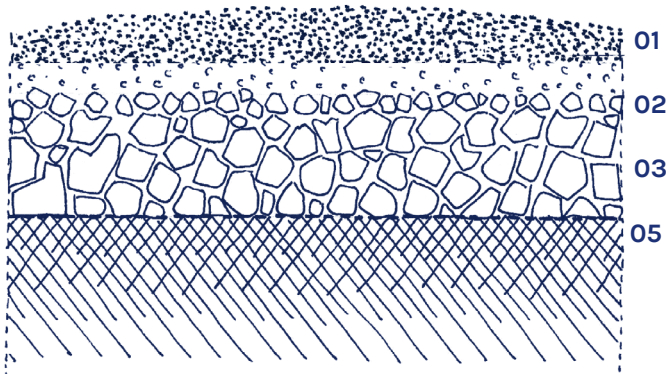
Gabriel Ruiz Cabrero

Terrizos



Caminos de terrizo sin base

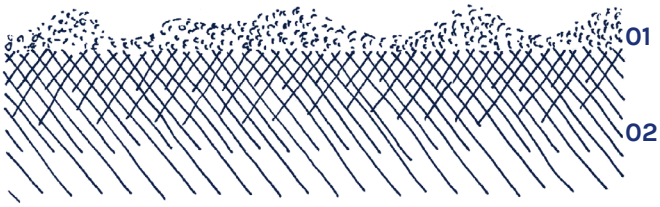
01 Mezcla de arenas, arcillas y limos compactada (capa opcional)
02 Suelo compactado



Caminos de terrizo con base

01 Capa de jabre o sauló e=3 a 5 cm
02 Base granular -gravas y arenas de 1 a 10 mm-o zahorra drenante e=5 a 8 cm
03 Subbase granular -gravas de gran tamaño- e=20 o 25 cm
04 Preferiblemente, bordillo rígido o cajeado.
04 Suelo compactado

*Este sistema constructivo no se estudia en profundidad en este documento. Se considera que su comportamiento es similar al de un terrizo, pero con mayor resistencia y permeabilidad.



Arenas -áreas de juego-

01 Arenas redondeadas
02 Suelo compactado

Fig T1. Camino de terrizo en la Dehesa de la Villa.
Fig T2. Albero en la Plaza de los Califas. (David Molina, 2008)
Fig T3. Terrizo en área de juegos infantiles.
Fig T4. Vía peatonal con acabado en terrizo.

Tipos de pavimentos hechos de agregados compactados:

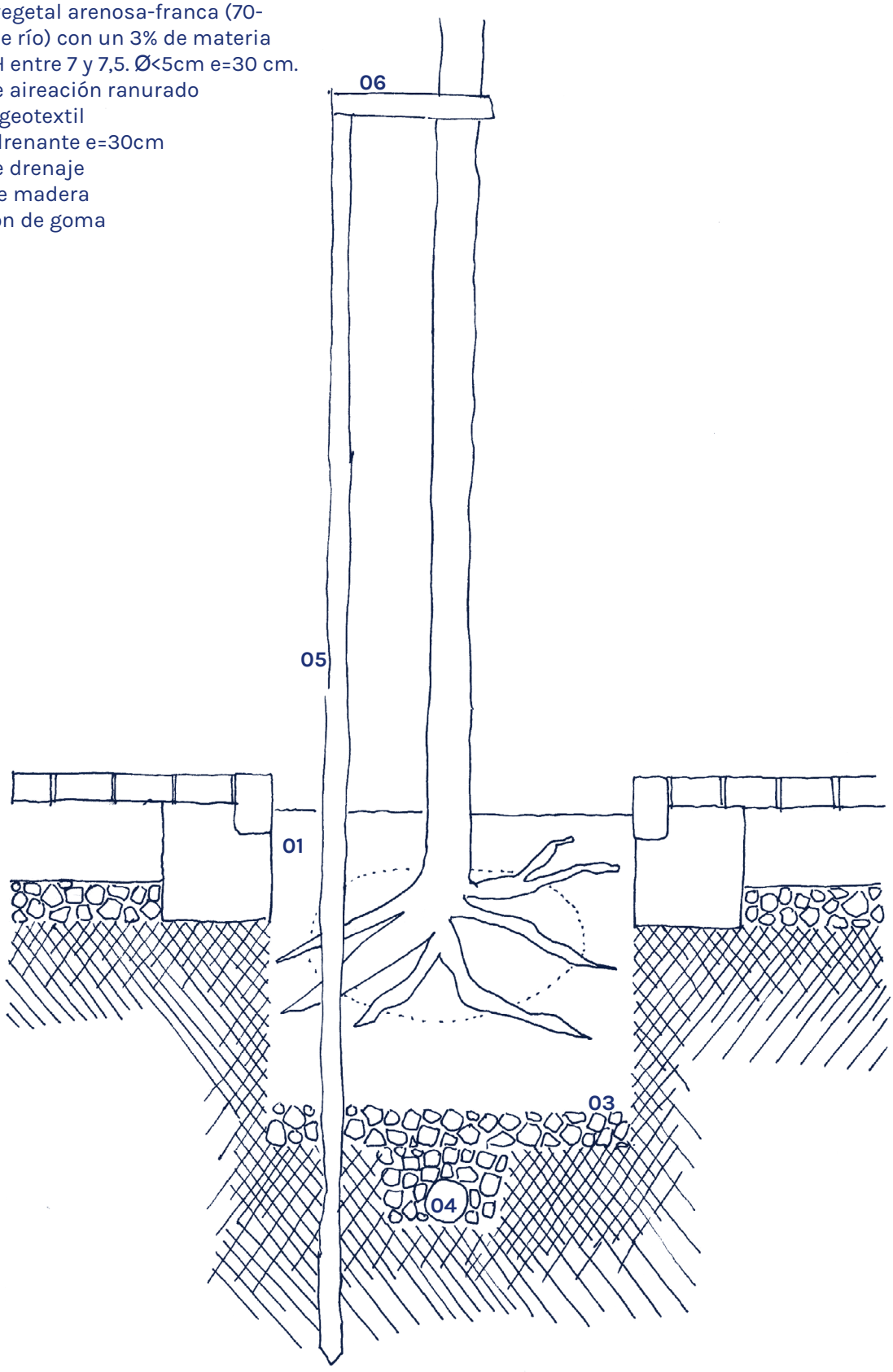
Existen distintos tipos de tierras compactadas que se utilizan como terrizos. Es complicado hacer un análisis exaustivo de los que se utilizan. Por lo general son mezclas principalmente arenosas con algo de limo o de arcilla.
Sus propiedades dependen del nivel de compactación y de su textura.

Ejemplos:
sauló (80% arenas, 4% limos y 16% arcillas) textura Franco-Arenosa. Proviene de la meteorización del granito de coloración rosada (Cataluña) -similar al jabre-
Compactado: Caminos
Sin compactar: Áreas de juego infantil
albero tipo de calcarenita procedente de la comarca de Los Alcores (Andalucía). Calcilta 80%, cuarzo 12% y otros minerales como filosilicatos 6% goethita 2%, entre otros.
Se pueden observar en ellos fragmentos de conchas marinas. Machacado y pulverizado.

Alcorques

Detalle de perfil de alcorque tipo 1

01 Tierra vegetal arenosa-franca (70-80% de arena de río) con un 3% de materia orgánica, un pH entre 7 y 7,5. Ø<5cm e=30 cm.
02 Tubo de aireación ranurado recubierto con geotextil
03 Grava drenante e=30cm
04 Tubo de drenaje
05 Tutor de madera
06 Cinturón de goma



Detalle de perfil de alcorque tipo 2

01 Tierra vegetal arenosa-franca (70-80% de arena de río) con un 3% de materia orgánica, un pH entre 7 y 7,5. Ø<5cm e=30 cm.

02 Tubo de aireación Ø=50mm envuelto en geotextil -110gr/m^2- en toda su longitud.

03 Suelo estructural e=75mm compuesto de:

-80% gravas de aristas vivas de origen granítico, de 2-4 cm, sin finos.

-20% tierra vegetal de textura franco-arenosa, con un máximo de 20% de arcillas y un 5% de materia orgánica.

-polímero hidroretenedor a una dosis de 1gr/l de suelo estructural.

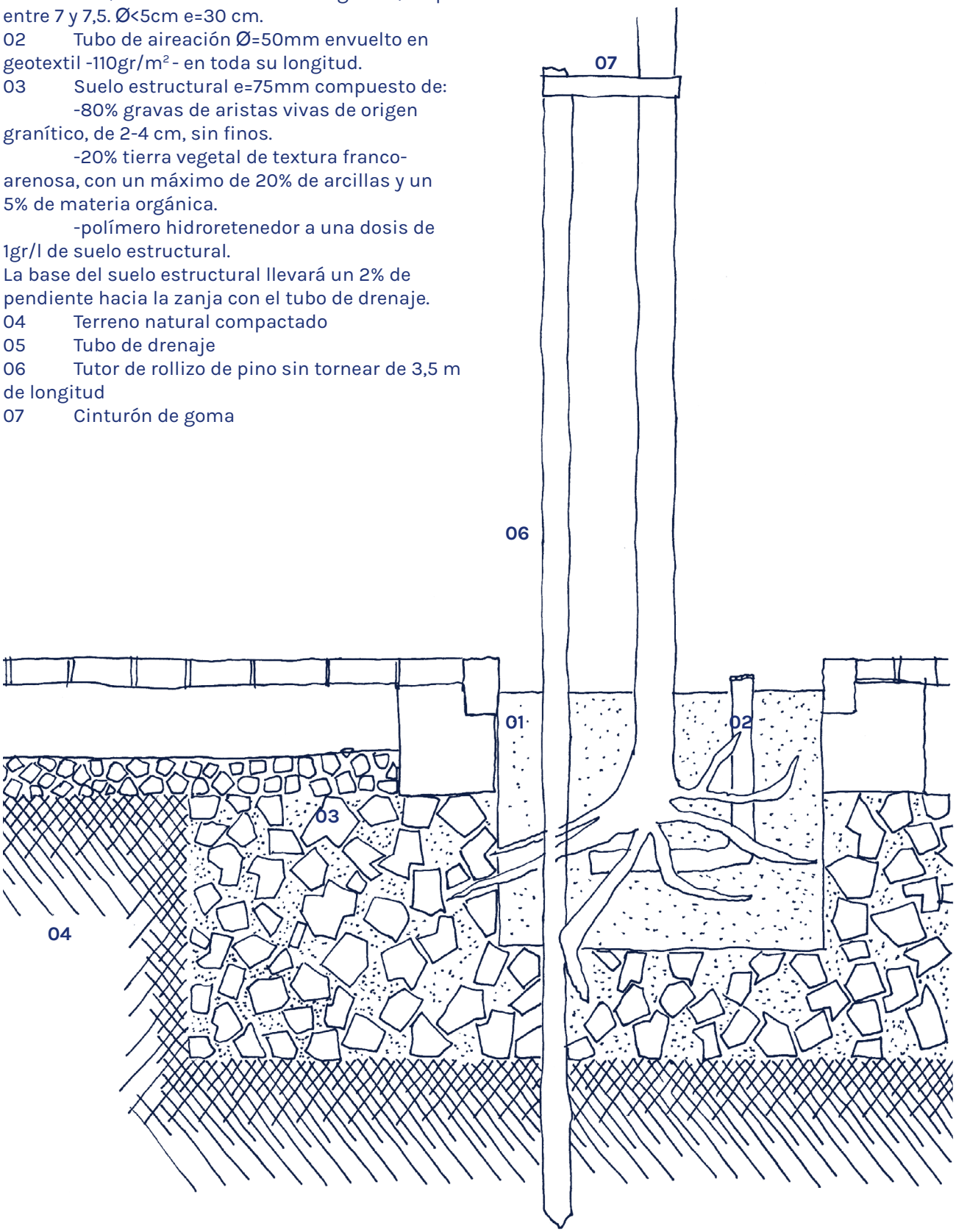
La base del suelo estructural llevará un 2% de pendiente hacia la zanja con el tubo de drenaje.

04 Terreno natural compactado

05 Tubo de drenaje

06 Tutor de rollizo de pino sin tornear de 3,5 m de longitud

07 Cinturón de goma



Alcorques

Detalle de perfil de alcorque tipo 3

01 Tierra vegetal arenosa-franca (70-80% de arena de río) con un 3% de materia orgánica, un pH entre 7 y 7,5. Ø<5cm

02 Tubo de aireación Ø=50mm envuelto en geotextil -110gr/m² - en toda su longitud.

03 Geocelda

04 Drenaje

*Christian Yseenbaardt -responsable de gestión de parques y jardines de Antwerp- asegura que se puede considerar que un árbol urbano crece durante un numero de años equivalente al número de metros cuadrados de suelo "natural" sobre el que está plantado. Este tipo de soluciones permiten ampliar el espacio de suelo - y el tamaño y salud de los árboles-.

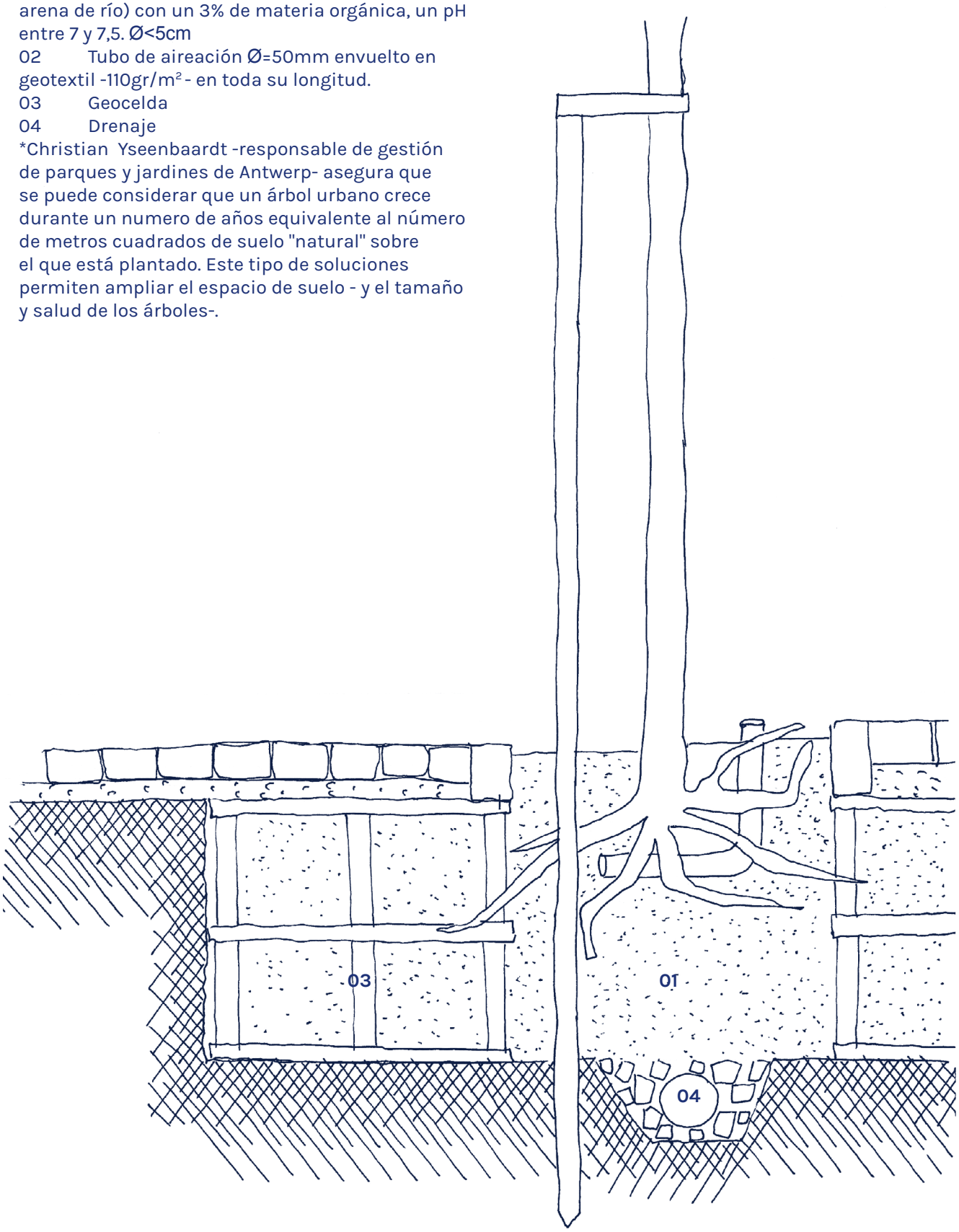
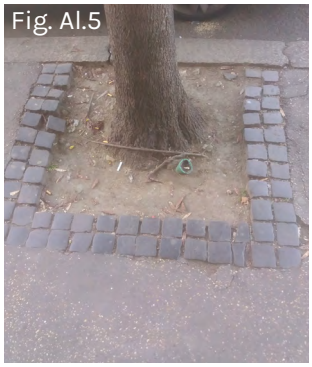


Fig Al.1 y Al. 7. "Super" Alcorque.
Fig Al. 2. Zanja vegetada
Fig Al. 3. Vegetación espontánea entre muros y pavimento.
Fig Al. 4. Vegetación espontánea en alcorque.
Fig Al. 5 y Al. 6. Alcorques.
FIg Al. 8. Alcorque vallado
Fig Al. 9 Alcorque con tapa.
Fig Al. 10. Desarrollo en superficie de raíces.



Análisis comparativo

Este estudio sistemático de superficies urbanas trata de comparar y comprender las distintas funciones y servicios que realizan los elementos escogidos.

Siempre se toman dos extremos de referencia: un suelo natural "pristino" y un suelo impermeable. Esto permite comprender en qué medida cada tipo de pavimento es capaz de realizar una función. En algunos casos no existen datos comparativos por lo que se realizan hipótesis. Finalmente se desarrolla un esquema que trata de resumir las cualidades responsables de una función en un material. Esto puede permitir diseñar nuevos pavimentos, más eficientes y baratos, capaces de maximizar sus funciones y, por tanto, sus servicios ecosistémicos.

Ciclo del agua

La principal diferencia de los pavimentos estudiados en este documento respecto de los convencionales es su comportamiento frente al agua. Por ello, aunque no todos puedan ser llamados "permeables", todos tienen cierta capacidad para retener, infiltrar o evaporar agua, influyendo en el balance hídrico urbano. Por esta razón, su introducción se suele justificar desde la voluntad de realizar una gestión mas sostenible del agua de lluvia que la convencional.

Introducción a la gestión sostenible del agua de lluvia

Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

En distintas ciudades se están introduciendo poco a poco Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDs), que tratan de detener o captar el agua de lluvia o favorecer su infiltración en los acuíferos. A escalas pequeñas, la introducción de SUDs puede tener distintos objetivos:

- Conectar nuevas áreas urbanas con sistemas de drenaje existentes mediante secciones mucho más pequeñas de lo estándar (Gobel et al., 2014).

- Conectar nuevas construcciones a depuradoras o sistemas de drenaje que tengan una capacidad limitada (Gobel et al., 2014).

- Aumentar la efectividad de los sistemas de drenaje e infiltración ya existentes (Gobel et al., 2014).

La introducción de SUDs sin duda supone un avance en la gestión de aguas pluviales al evitar la escorrentía y mejorar la efectividad de los sistemas de drenaje tradicionales.

En general, estos sistemas de gestión proponen como sistemas zanjas vegetadas, pozos de infiltración, `jardines de lluvia´ o pavimentos permeables. Sin embargo, en Estados Unidos las Best Management Practices (BMPs) indican que los pavimentos permeables (PP) sólo se pueden introducir con monitoreo, por lo que resultan inviables económicamente para pequeñas intervenciones o particulares. Esto se debe a que estos pavimentos son susceptibles a atascarse y convertirse en poco permeables. Según las publicaciones y los países, los PP son o no son "SUDs".

Sin embargo, para una correcta gestión del agua, es necesario tener en cuenta una escala mas global. La proliferación de SUDs sin una estrategia coordinada puede tener efectos en el medio ambiente.

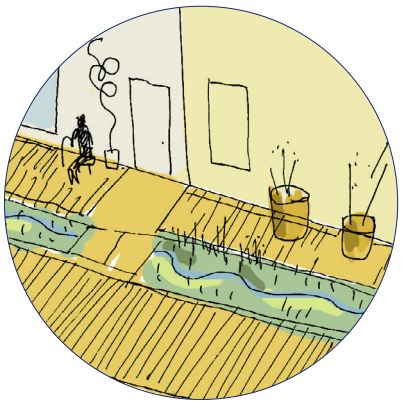


Figura B.01: Zanja de infiltración. SUDs

Near-Natural Concept

Por esta razón, algunos países o ciudades -Alemania, EEUU, Australia, Francia, Holanda entre otros- están proponiendo alternativas `globales´ a la gestión convencional del agua de lluvia. Se están aplicando sistemas de gestión de aguas de lluvia que tienen por objetivo reproducir las condiciones naturales

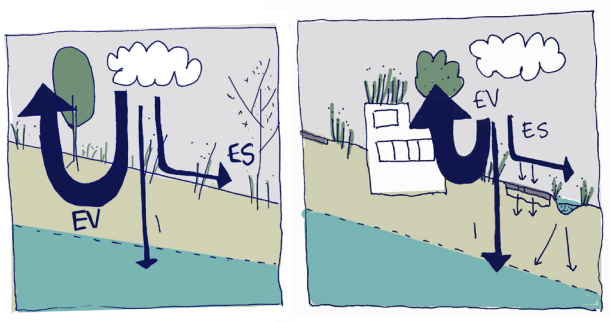


Figura B.02: Near Natural Concept: mantenimiento del mismo balance hídrico en las ciudades. (Adaptación de dibujo de Göbel et al., 2004)

o previas a la edificación. Estos sistemas se conocen como *Near-Natural Concept for Stormwater Management*. Proponen (1) el estudio del balance hídrico en áreas sin urbanizar y (2) la reproducción del balance hídrico en el proceso de urbanización. El principal objetivo de este concepto es adaptar el balance hídrico urbano al natural (Göbel et al., 2010). Este método es, sin embargo, limitado para ciudades existentes, donde o bien no existe un referente histórico claro, o bien los ecosistemas ligados a las ciudades ya están adaptados a la perturbación.

Este sistema propone una alternativa a la modificación -abrupta- del balance hídrico que suponen la gran mayoría de las ciudades. En cierta medida, está ligado al principio de retención, y el objetivo principal es retrasar y disminuir la escorrentía, que queda almacenada en pavimentos, en suelo natural o en cubiertas (Gobel et al. 2004). De esta forma, una parte del agua puede evaporarse a través del suelo y de las plantas, otra puede infiltrarse en el subsuelo -recargando los acuíferos- y, si es necesario o no es posible infiltrar la totalidad del agua, otra parte puede ser drenada después de un tiempo, disminuyendo la escorrentía pico -*peak flow*- (Gobel et al. 2004).

Este tema se desarrolla en el artículo *Concept for near-natural storm water control in urban areas* (Göbel, Coldewey 2010). Introduce el concepto de gestión de aguas de lluvia "restaurado respecto de un referente ecológico" e incluye una pequeña guía general que tiene por objetivo ayudar a la toma de decisiones de planificadores o gestores urbanos en la implantación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. Esta guía se basa tanto en conceptos de cantidad como de calidad del agua.

Sin embargo, más allá de la infiltración como técnica de gestión de agua, esta guía no estudia la evaporación como parte relevante del ciclo del agua. Un sistema "casi natural" debería tratar de reproducir a través del diseño tasas de evaporación, transpiración y escorrentía, conectando las áreas urbanas con las redes de drenaje naturales circundantes (Hollenbeck and Göbel, 2013).

Riesgos de la ausencia de planficación

La introducción de SUDs a escala urbana sin una estrategia global puede tener algunos riesgos. El principal es la elevación del nivel freático.

El nivel freático varía de forma estacional, a largo plazo y depende de las actividades humanas. La subida del nivel freático o aumento de humedad en el suelo puede causar distintos problemas (Gobel et al., 2004). No sólo las cimentaciones enterradas y las construcciones subterráneas y enterradas pueden verse afectadas, sino también los acuíferos pueden contaminarse por presencia de cementerios o actividades industriales contaminantes.

Si la infiltración va a ser una estrategia a gran escala, podría ser necesario determinar el potencial ascenso del nivel freático y las consecuencias de éste. Esto puede ser algo particularmente complicado en Madrid.

Por estas razones, algunos investigadores (Gobel et al., 2013) proponen que los sistemas urbanos de drenaje sostenible, y en particular los pavimentos, deben tener por objetivo principal no sólo disminuir la escorrentía y aumentar la infiltración, sino también favorecer la evaporación. Esto supone un cambio de paradigma en la gestión de aguas pluviales.

Otro riesgo es la modificación de los caudales de la cuenca hídrica "aguas abajo". Un sistema basado en la captación o en la evaporación -aún reproduciendo tasas de referencia respecto de un referente histórico- podría suponer una disminución de la cantidad de agua que llega a las redes hídricas. Estas han adaptado sus usos y su forma al caudal que reciben -sin tener en cuenta un referente histórico-, por lo que una disminución del caudal podría tener graves consecuencias.

Es necesario estudiar y evaluar estos impactos a escala global para tener en cuenta la magnitud de la intervención que implicaría una gestión mas sostenible de agua sin causar riesgos a la salud humana ni al medio ambiente.

El referente ecológico en hidrología

En resumen, según lo estudiado, y para minimizar el efecto sobre los edificios y sobre los ecosistemas ligados al agua podría ser importante trabajar con un referente ecológico y tratar de reproducir -en la medida

de lo posible- las tasas de escorrentía evaporación e infiltración. Sin embargo, la selección de este referente puede no ser evidente, ya que o bien las condiciones previas pueden no ser óptimas y estar degradadas -por ejemplo, una parcela de uso agrícola- o bien la cuenca aguas abajo se ha adaptado a perturbación.

Por otra parte, si no se desea o no es posible trabajar con un "referente ecológico", también es posible tratar de utilizar los pavimentos como sistemas para mitigar o reducir problemas ambientales específicos de un espacio urbano. Conocer las propiedades específicas de cada tipo de pavimento es el primer paso para esto. Por ejemplo, la introducción de pavimentos o suelos que favorezcan la evaporación puede ser una estrategia eficaz para mitigar las temperaturas extremas.

Objetivos del diseño de pavimentos

La elección de un pavimento puede o tiene que estar determinada, además de por sus aspectos estéticos o por criterios de uso, por su comportamiento frente al agua.

En cualquier caso, el agua de precipitación que alcanza la superficie de un pavimento puede:
-infiltrarse
-evaporarse
-deslizarse por la superficie (escorrentía) (Scholtz, 2010). La cantidad de agua en cada uno de estos puntos determina el comportamiento hídrico.

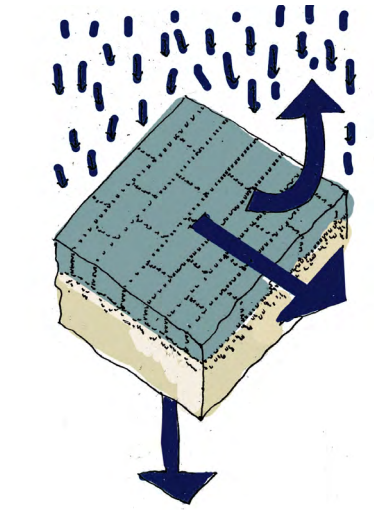


Figura B.03: El agua que alcanza una superficie urbana puede infiltrarse, evaporarse o deslizarse por la superficie

Es necesario comprender de qué forma estas tres variables interactúan entre sí y cómo varían estas tasas según los tipos de pavimentos. La mayor diferencia entre los pavimentos estudiados y los convencionales es su comportamiento frente al agua.

Sin entrar en detalle, los pavimentos estudiados son mas o menos permeables o transpirables al agua o al vapor de agua y los convencionales no lo son en absoluto.

A su vez, dentro de los pavimentos estudiados, el comportamiento hídrico difiere de forma significativa:

-Los PP son un sistema tecnificado desarrollado específicamente para infiltrar el agua en el subsuelo. Su comportamiento frente al agua depende esencialmente de: la superficie de los pavimentos y la base granular sobre la que se apoya.

-Los PT son sistemas de piezas apoyadas o hincadas en el suelo, por lo que su infiltración depende directamente de la del suelo y del tamaño y características de la juntas, sin embargo permiten el ascenso de agua por capilaridad y la evaporación de la misma. Esta capilaridad se ve limitada por la compactación del suelo.

-Los terrizos son parcialmente permeables y transpirables. Son distintas mezclas de suelos compactados. Su comportamiento varía mucho según la granulometría de los materiales que lo componen. Algunas mezclas -para caminos rurales- tratan de disminuir al máximo su permeabilidad.

-Los alcorques son zonas de suelo que varían mucho su comportamiento hídrico según su compactación, la cantidad de vegetación y la diferencia de altura con la acera -que permite configurar estanques temporales.

En ese sentido es necesario escoger el tipo de pavimento según el objetivo que se desee lograr.

<u>Detención</u>
Consiste en detener el agua en la subbase y retrasar el momento de acceso de este agua a la red de drenaje.

La detención de agua se produce esencialmente en los pavimentos permeables cuando estos no se diseñan para infiltrar agua, sino para retrasar el momento en que se introduce el agua de lluvia en la red de saneamiento, permitiendo ampliar su capacidad.
Se puede realizar también en áreas donde no sea posible infiltrar agua en el subsuelo.

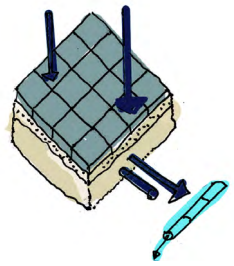


Figura B.04:
Retraso del momento del agua de escorrentía a la red de drenaje

Infiltración

La infiltración se realiza para mantener el balance hídrico - llenando los acuíferos- o para descargar la red de drenaje urbano.

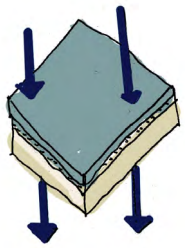


Figura B.05:
Infiltración: mantenimiento del balance hídrico

Captación
Otra posibilidad consiste en captar el agua de lluvia para utilizarla como agua de riego o como agua no potable para el baldeo de las calles. También es una técnica posible en áreas donde no sea posible infiltrar agua en el suelo.

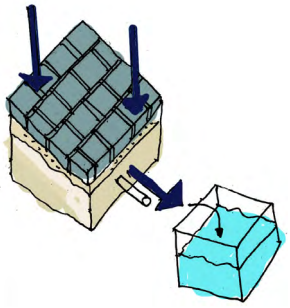


Figura B.06:
Captación: uso en otras superficies urbanas

Evaporación

La retención de agua para evaporación puede ser un posible destino del agua en lugares de mucho calor.

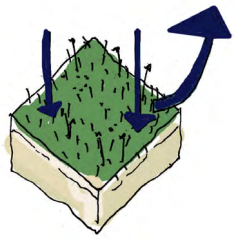


Figura B.07:
Evaporación o evapotranspiración
Mejora del clima

Influencia de las condiciones de contexto en el comportamiento hídrico

Las condiciones de contexto hacen variar de forma significativa el funcionamiento del pavimento. Según su posición relativa respecto de la red hídrica, el tipo de suelo que tenga debajo, la intensidad de la lluvia, la pendiente, puede variar su comportamiento mucho. Por ello, se recomienda realizar estudios sobre cada tipo de suelo y realizar un seguimiento en el clima local.

Suelo

El suelo sobre el que se realiza el pavimento tiene una gran importancia para el diseño "hidráulico" del pavimento.

Por lo general se considera que los suelos con perfiles superficiales mas arenosos tienen capacidad para infiltrar mas agua y los suelos con suelos arcillosos menos.

En el caso de pavimentos permeables, aunque la infiltración de la superficie sea muy elevada, la permeabilidad del suelo condiciona de forma significativa la permeabilidad total (Tyner et al., 2009).

La práctica general consiste en compactar los suelos antes de poner el firme o el pavimento. Esto provoca que los suelos arcillosos disminuyan de forma abrupta su

porosidad al eliminar una gran cantidad de poros grandes.

En la siguiente tabla se puede observar la conductividad hidráulica aproximada de los distintos tipos de suelo sin estructura y sin compactar .

Tasas de infiltración aproximadas en suelos sin estructura		
Textura	Conductividad hidraúlica saturada	
	m/s	mm/h
Arenas	5,83E-05	210,1
Arenas margosas	1,70E-05	61,2
Margas arenosas	7,20E-06	25,9
Margas	3,67E-06	13,2
Margas limosas	1,91E-06	6,9
Conductividad límite del suelo según normativa alemana	1,00E-06	3,6
Arcillas limosas	1,41E-07	1,0
Arcillas	2,82E-07	0,5

Tabla B.08: Conductividad hidráulica saturada según tipos de suelo sin estructura. (Adaptado y convertido de Ferguson, (2005) citando a Rawls, et al., (1982))

En el caso de los pavimentos tradicionales, la compactación es obligatoria para limitar el crecimiento de la vegetación y asegurar el menor desplazamiento posible del pavimento.

Suelos con permeabilidad alta

En general es sobre este tipo se suelos donde se considera que es posible infiltrar agua. La normativa alemana exige una conductividad hidráulica de K_s>10-^{6}m/s (Gobel et al, 2010)

Suelos con baja permeabilidad

En general se utilizan con sistemas para retrasar el *peak flow* o captar agua. En un sitio con baja permeabilidad no tiene sentido infiltrar agua.

Paradójicamente, todos los esfuerzos para aumentar las tasas de infiltración de los pavimentos se ven limitadas por las tasas de infiltración de los suelos sobre los que se asientan, que generalmente se compactan previamente para asegurar su resistencia.

Existe poca investigación sobre el uso de pavimentos permeables sobre suelos sin compactar y sobre el uso de pavimentos sobre suelos con baja permeabilidad (Drake et al., 2013). Los estudios que se suelen realizar no tienen en cuenta la evaporación y las características heterogéneas de los suelos, (como las fracturas), por lo que se puede subestimar su conductividad hidráulica total (Drake et al., 2013).

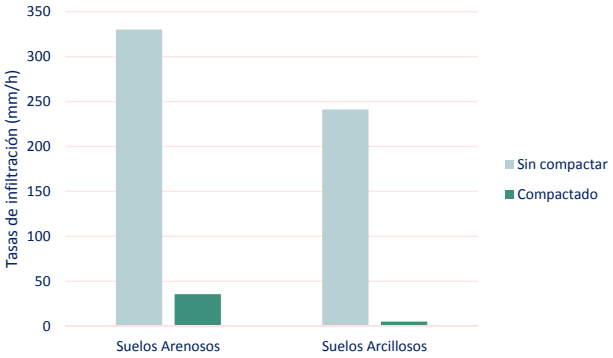


Figura B.09: Infiltración media de suelos compactados y sin compactar en condiciones húmedas, (adaptado y traducido de Ferguson, (2005), citando a Pitty Lantrip, (2000))

Además, estudios recientes de esta disciplina (Tyner et al., 2009) demuestran que la creación de zanjas o perforaciones, o simplemente rasgar la superficie lisa puede mejorar la capacidad del suelo para infiltrar agua. Por otra parte , Ferguson (2005) recomienda compactar lo mínimo el suelo o incluso no compactarlo.

Desde un enfoque mas genérico-centrándose en taludes de carretera-, la investigación de Proyecto CENIT (Construcción Limpia, Eficiente y Amigable con el Medio Ambiente CLEAM oDTI 2007/10) también propone la rugosidad y la perforación como técnicas para aumentar la infiltración.

Esta alternativa -de perforación- podría también ser evaluada y utilizada en terrizos, generalmente muy afectados por fenómenos de erosión hídrica -formación de regueros, *splash* erosión, etc.

Cabe preguntarse si esta deformación del suelo puede tener consecuencias en la capacidad de carga de las superficies pavimentadas.

Clima e Intensidad de lluvia

El clima de Madrid es mediterráneo continentalizado por lo que en verano existen fuertes periodos de sequía, que se combinan con lluvias torrenciales.

Si el objetivo de la introducción de este tipo de pavimentos es exclusivamente la gestión del agua a escala urbana, sería necesario evaluar si no es mas eficiente, además o de forma complementaria, introducir zanjas de infiltración o canales de drenaje, teniendo en cuenta las lluvias torrenciales, que pueden aumentar de forma significativa la escorrentía y hacer que los PP no sean una medida eficiente.

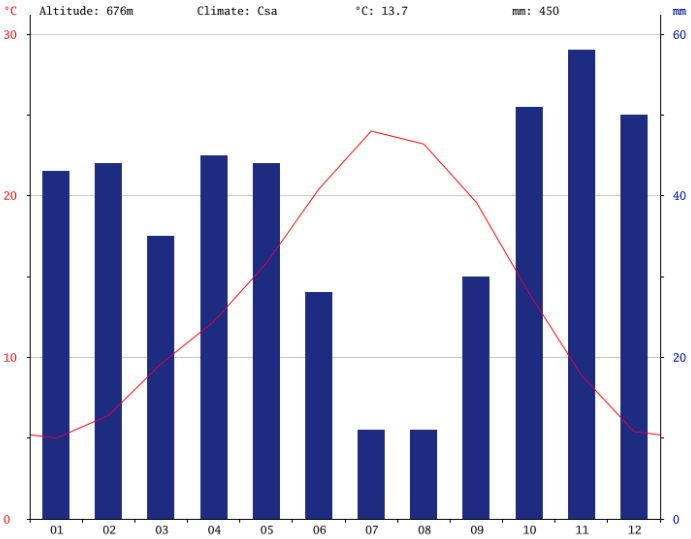


Figura B.10: Precipitaciones medias en Madrid Fuente : Climate-Data.org

Por otra parte, en general se seleccionan distintas variedades de césped para integrarlas en pavimentos permeables con vegetación. Estas especies, en el clima madrileño, requieren de riego durante el periodo estival.

Sería necesario evaluar la idoneidad de introducir semillas de variedades locales adaptadas a periodos de temperaturas extremas y su fragilidad potencial en el contexto urbano, así como evaluar tipos de juntas "finas" pero numerosas, donde la ausencia de vegetación no se perciba como ausencia de cuidado.

Finalmente, las temperaturas extremas -frías- ponen en jaque -ya prohibido por ley-el uso de pavimentos de ladrillo cocido - no klinker ni hidrofugado- en exteriores por heladicidad. Sin embargo, dado su funcionamiento higrotérmico, es importante estudiarlo. Tal vez pueda ser útil para espacios interiores cubiertos no sujetos a temperaturas inferiores a 0ºC. A pesar de ello, se pueden encontrar en algunos jardines madrileños -delante de la Escuela de Montes, o en el jardín junto a la Plaza de la Paja.

La recurrencia de episodios de tormenta de alta intensidad permite dimensionar los PP y permite observar en que medida los PT no son útiles para limitar las inundaciones. (Ver figura B.11) Sin embargo, respecto de cantidades globales de agua, los PT pueden servir para limitar la escorrentía en lluvias ligeras

Los PP, en cambio, se calculan para retener agua en episodios de tormenta.

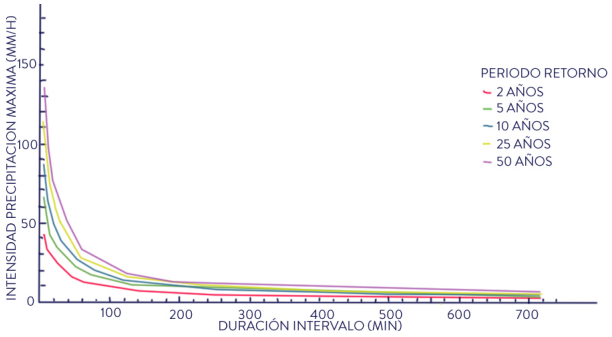


Figura B.11: Curva IDF -Intensidad Duración Frecuencia- estación Retiro (Curvas IDF, 2003)

Situación relativa respecto de la red hídrica

Por otra parte, en un entorno urbano, la infiltración y escorrentía dependen de forma significativamente del lugar en el que se encuentren.

Si un suelo se encuentra "aguas arriba" de la escorrentía o "aguas abajo", la cantidad y velocidad del agua puede variar significativamente, y con ello su escorrentía.

En este sentido, los alcorques se configuran por lo general como pequeñas depresiones en el paisaje urbano, capaces de retener el agua.

Escorrentía e infiltración

Escorrentía

Definición

La escorrentía es el flujo de agua que discurre por la superficie sin infiltrarse en el subsuelo ni ser captada por el suelo o el pavimento. Los sistemas de drenaje tradicionales implican que prácticamente la totalidad del agua de lluvia se desliza por la superficie hasta los desagües donde se gestiona a través de la red de saneamiento.
Minimizar la escorrentía ayuda a mejorar la eficiencia de la red de drenaje, y evitar inundaciones.

Se suele medir mediante el coeficiente de escorrentía, medida entre 0 y 1, que indica el porcentaje de agua que discurre por la superficie frente al que es atrapado por el pavimento o por el suelo. Este coeficiente aumenta con la intensidad de la lluvia y la inclinación del pavimento, y depende de la permeabilidad, la textura y la forma del

mismo. Las gotas de agua no saturan la superficie del pavimento, sino que discurren por la superficie.

En general se suele admitir que una permeabilidad muy elevada equivale a un coeficiente de escorrentía bajo. Sin embargo existen algunos caso en que pavimentos con una gran permeabilidad (o lo que es lo mismo, con un coeficiente Ks de conductividad hidráulica saturada elevado), tienen mas escorrentía que otros pavimentos con un K mas bajo. Ferguson (2005), explica esto comparando las gravas (K muy elevado) con algunos pavimentos permeables con vegetación.

Una escorrentía elevada degrada la integridad de los ecosistemas acuáticos, altera los regímenes hídricos, y aumenta la cantidad de nutrientes y contaminantes en los ríos (Gobel et al. 2010).

Problemas ligados a la escorrentía alta: erosión

La alta escorrentía esta relacionada con las inundaciones. Las lluvias intensas o grandes masas de agua de escorrentía pueden producir regueros en los terrizos de parques y en lo caminos naturales, frutos de la escorrentía.

En la actualidad se están desarrollando técnicas de restauración ecológica (Proyecto CENIT (Construcción Limpia, Eficiente y Amigable con el Medio Ambiente CLEAM oDTI 2007/10) - por el momento para suelos "naturales" degradados. Sin embargo, sería posible preveer o adaptar su uso en el diseño de espacio público. Otra técnica - mediante en el programa GeoFluv Natural Regrade- permite diseñar redes de drenaje estables a la erosión, particularmente interesantes para el diseño de bordes de caminos o zanjas de infiltración (ver apartado de vegetación).

	Coeficiente de escorrentía	**Fuente**
Superficie impermeable	**0,73 a 0,95**	Göbel et al. 2010, Ferguson, 2005 (cita a Chow et al. 1988 p 298, Van der Leeden et al,1990, St John and Horner 1997)
Pavimentos permeables		
Adoquines con Juntas filtrantes	0,0 a 0,5	Drake et al., 2013 (cita a Abbot & Comino, 2003, Collins et al, 2008), Ferguson, 2005 (cita a Borgwardt 1999 and 1997), Gobel et al. 2013
Asfalto y hormigones porosos	0,1 a 0,40	Ferguson, 2005 (cita a St John and Horner 1997), Drake et al, 2013 (cita a Bean et al., 2007, Collins et al, 2008),
Con vegetación (+50%)	0,05 a 0,53	Ferguson, 2005 (Chow et al., 1988, van del Leeden et a., 1990, Day et al 1981, Goforth et al 1983), Drake et al, 2013 (cita a Bean et al., 2007, Collins et al, 2008),
Pavimentos tradicionales		
Adoquines o piezas de menos de 8 cm	0,30 a 0,60	AGU Arbeitsgemeinschaft Umweltplanung 1988
Adoquines madrileño	---	
Losas o piezas grandes	---	
Juntas con mortero de cal	---	
Ladrillo con mortero de cal	---	
Terrizos		
Terrizos con mezclas arcillosas (max)	0,5 a 0,7	Ferguson, 2005 (cita a USFAA, 1965, Appendix 1, p.1) AGU Arbeitsgemeinschaft Umweltplanung 1988 (cita a Meyer,1978; Din 1984; Imhoff,1975)
Terrizos con mezclas arenosas (min)	0,13 a 0,3	Ferguson, 2005 (cita a USFAA, 1965, Appendix 1, p.1) AGU Arbeitsgemeinschaft Umweltplanung 1988 (cita a Meyer,1978; Din 1984; Imhoff,1975)
Alcorques		
Alcorques compactados sin vegetación	0,0 a -?	
Alcorques con vegetación	0,0 a -?	

*Los rangos se deben a distintas condiciones de contexto y distintos métodos de estudio. Pueden variar de forma significativa. Son orientativos, y permiten hacer una idea del rango de variabilidad entre tipos generales y específicos

Tabla B.12: Coeficientes aproximados de escorrentía según tipos de pavimentos

Infiltración

Definición

La infiltración se produce cuando el agua de lluvia que llega a un pavimento se introduce hacia los niveles de firme o suelo a través de las juntas. Por otra parte, la percolación se produce cuando el agua se introduce a través de poros. Una parte del agua infiltrada percola en el subsuelo y la otra se evapora. Se suele distinguir entre percolación profunda -*deep percolation*- cuando el agua se infiltra en el suelo o percolación superficial cuando lo hace hacia los materiales porosos de pavimentación. En algunos diseños, se infiltra agua en la subbase para captarla.

La infiltración depende de: la permeabilidad del material, la rugosidad de la superficie, la forma de la superficie, la inclinación, la longitud de la superficie y la velocidad del agua.

En general se mide la conductividad hidráulica Ks de las superficies. Este factor está muy relacionado con la infiltración, pero no es el único. Sin embargo, tiene una gran influencia la inclinación y la intensidad de la lluvia o tormenta. Aunque resulte mas interesante conocer la escorrentía que la infiltración, su medida es mucho mas complicada. Y la conductividad hidráulica saturada, puede dar una idea de la capacidad de infiltrar agua de un material o superficie.

También se mide para el suelo en que se apoyan los pavimentos. Este análisis es imprescindible y varía mucho según el nivel de suelo. Cada horizonte tiene una tasa de infiltración distinta. Es prudente usar el valor del horizonte que sea menor y que se encuentre a un metro por debajo del pavimento o firme propuesto.

Variables de la escorrentía y la infiltración

Pendiente

La pendiente disminuye la infiltración y aumenta la escorrentía en todos los pavimentos.

Generalmente no se suele recomendar pendientes mayores a 5% en los PP, sin embargo las razones para poner este límite no se suele justificar mediante estudios claros- (Lucke et al., 2013). Distintos investigadores han realizado pruebas con PP con piezas y han demostrado tasas de infiltración satisfactorias en superficies de hasta 20% de inclinación. Sin embargo, la gran mayoría de materiales limita su uso a 5% -una medida que parece excesivamente conservadora.

RECIÉN CONSTRUIDO	Conductividad hidráulica saturada Ks (mm/h)		Conductividad hidráulica saturada Ks (m/s)		Fuente
	min	max	min	max	
Superficie impermeable	0	10	**0**	**10**	Wessolek, 2005
Pavimentos permeables					
Adoquines con Juntas filtrantes	12240	225000	3,40E-03	6,25E-02	Starke et al. 2010
Asfalto y hormigones porosos	12600	42840	3,50E-03	1,19E-02	Starke et al. 2010, Bean et al.2003, Sañudo-Fontaneda et al. 2013
Otros materiales porosos con aglutinantes	-				
Con vegetación (+50%)	350	6120	9,72E-05	1,70E-03	Bean et al. 2003, Sañudo-Fontaneda et al. 2013
Con grava (+50%)					Starke et al. 2010
Limite legal en Alemania	**194,4**		**5,40E-05**		Starke et al. 2010
Límite legal en Holanda	**97,2**		**2,70E-05**		Lucke et al. 2013
Pavimentos tradicionales					
Adoquines o piezas de menos de 8 cm	10	mas de 70		1,94E-05	Wessolek, 2005
Adoquin madrileño	-	-			
13% juntas	10	126		3,50E-05	Wessolek, 2005 Starke et al. 2010
Juntas con poco mortero de cal	-	-	-	-	
Ladrillo con mortero de cal	-	-	-	-	
Terrizos					
Arenas graduadas a arenas gruesas	6,35	1270	1,76E-06	3,53E-04	Ferguson, 2005
Gravas		151200		4,20E-02	Starke et al. 2010
Alcorques					
Alcorques compactados sin vegetación	**-**		-		
Alcorques con vegetación	-		-		

*Los rangos se deben a distintas condiciones de contexto y distintos métodos de estudio. Pueden variar de forma significativa. Son orientativos, y permiten hacer una idea del rango de variabilidad entre tipos generales y específicos

Tabla B.13: Porosidad y Conductividad hidraulica de distintos tipos de pavimentos

Ferguson (2005) declara que esta pendiente no puede ser mayor a 5% porque la velocidad del agua aumentaría significativamente en la subbase y se podría producir erosión interna del suelo sobre el que apoya el pavimento.

Si esta fuera la razón, sería necesario evaluar si técnicas como las explicadas en el capítulo anterior: perforación, rugosidad, o incluso creación de zanjas o geoformas podría ser una medida eficaz para frenar esta erosión.

Por otra parte, Lucke et al. (2013) realizan un experimento en su trabajo en el que comparan la infiltración entre PP con juntas o asfaltos porosos con valores de intensidad que varían entre periodos de retorno de 2 y 100 años con diferentes inclinaciones. Se observa una gran diferencia en la infiltración entre los PP de piezas y los pavimentos de bloques porosos. Los PP de piezas permiten infiltrar el agua mucho mas rápido -i.e. en mucho menos recorrido- que los pavimentos porosos, sin generar una escorrentía importante.

Sin embargo en este estudio no tienen en consideración el atasco o bloqueo y su influencia en casos de pendiente, algo que podría modificar significativamente el comportamiento de este tipo de pavimentos.

Vegetación

La presencia de vegetación favorece la infiltración y la retención de agua. Experimentos urbanos como los realizados en Nantes, que consisten en no cortar las malas hierbas existentes en el pavimento pueden aumentar de forma significativa la infiltración, sin realizar obras de modificación del pavimento. (Ver apartado de vegetación)

Infiltración y compactación

Existen pocos estudios (Wessolek, 2005; AGU, 1988) que evalúen de forma sistemática el comportamiento frente al agua de los PT. En ellos se asegura que la infiltración de este tipo de pavimentos es bastante alta nada mas construidos.

Por ello, además de reportar sus datos, este documento los asocia a suelos compactados. Además se puede, considerar que sus tasas de infiltración pueden variar en función de dos elementos: (1) a más juntas y mas profundad de la junta más espacio de almacenamiento, (2) a mayor rugosidad del suelo, mayor infiltración.

Yang et Zhang, (2011), estudian el efecto de la compactación en distintos suelos urbanos franco-limosos, según su edad, porosidad, grado de compactación y densidad y cobertura.

Los resultados que obtienen muestran una gran variabilidad del comportamiento del suelo, además muestran algunos resultados relevantes:

-a mayor compactación menor infiltración por la disminución de macroporos y microporos.

-a menor porosidad menor infiltración

-a mas edad -años- mayor infiltración Explican que esta infiltración puede aumentar por la creación de redes de drenaje internas, y desarrollo de raíces. Este dato contradice el documento de Wessolek (2005), en que la buena infiltración de pavimentos tradicionales disminuye de forma abrupta con la creación de musgo en las juntas.

-cuanto más arenoso y es un suelo mayor es su infiltración y cuanto mas arcilloso o limoso menor.

La razón que dan para esto, citando a Rahardjo et al. (2008) es que los limos y las arcillas tienen un coeficiente de viscosidad y de succión de agua mayor que la arena, incluso cuando los poros son similares, por lo que la velocidad de infiltración disminuye. Además, las arenas aumentan la infiltración por lo que tienden a formar lugares con flujos preferentes. Madrid tiene en muchos lugares arenas de miga, por lo que, en teoría, esto favorecerá la infiltración.

La tasa de infiltración disminuye a medida que el suelo se humedece. Esto puede deberse entre otros, a la expansión de las arcillas. Robbert Pitt (2002), realiza un estudio mas extenso sobre este punto en particular donde evalúa la influencia del estado de humedad en los coeficientes de infiltración. Su aportación consiste, básicamente, en comprender dos tipos de comportamientos: uno para suelos mas arenosos y uno para suelos mas arcillosos. En el primero la humedad del suelo tiene una menor influencia en el coeficiente de infiltración que en el segundo.

Juntas

Conductividad hidraúlica saturada
según tamaño de partículas de las juntas

Tamaño aproximado		Conductividad hidraúlica saturada	
		m/s	mm/h
10 a 5 mm	max	2,82E-02	101600,0
	min	9,88E-03	35560,0
2 a 5 mm	max	9,88E-03	35560,0
	min	9,88E-04	3556,0
1 a 3 mm	max	9,88E-04	3556,0
	min	9,88E-05	355,6
Arena: 0 a 5 mm	max	9,88E-05	355,6
	min	9,88E-06	35,6
Arena: 0 a 2 mm	max	9,88E-06	35,6
	min	9,88E-07	3,6

Tabla B.14: Conductividad hidráulica según el material de las juntas. Esto permite entender el funcionamiento de PP y PT.

En el caso de las superficies realizadas por piezas, el rol del material de la junta es definitivo.

La importancia de la composición de las juntas y de la superficie de juntas. En esta tabla se puede observar como la tasa de infiltración es muy alta para 2 a 5 mm, que es la medida de partículas recomendada para los pavimentos permeables.

Al descender con los años un 80 o un 90%, es posible mantener tasas de infiltración elevadas que permitan la protección frente a episodios de alta intensidad

En el caso de las juntas que tienen arenas y arcillas, la tasa de infiltración se modifica mucho a lo largo de un mismo periodo de lluvia. Aun teniendo unas tasas iniciales muy altas, están disminuyen abruptamente quedándose alrededor de 10 mm/h o menos en el caso de pavimentos viejos.
La presencia de vegetación sin embargo, puede aumentar de forma signficativa la infiltración.

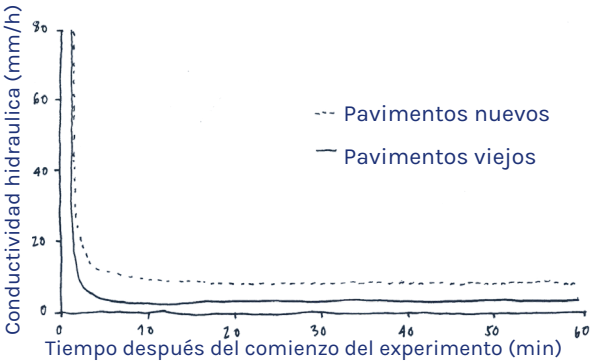


Figura B.15: Conductividad hidráulica de pavimentos nuevos y viejos en pavimentos de piezas (gráfica elaborada sobre la de Wessolek, 2005 que lo adapta de Bischoff 1966).

A largo plazo

Los pavimentos permeables (PP) ofrecen un gran beneficio respecto del resto: su gran capacidad de infiltración. Sin embargo, esta se ve puesta en entredicho a largo plazo, por el fenómeno de *clogging* o atasco.

El *clogging* ocurre cuando los poros o las juntas se rellenan de sedimentos, materia orgánica o restos de desechos urbanos. Se suele considerar que el atasco ocurre cuando la conductividad hidráulica del filtro primario baja a un tercio del original o por debajo de los límites legales. Este fenómeno sucede esencialmente al rellenarse los primeros 5 cm de juntas. (*Berry C. T. PHD, Coventry University*). En general, la presencia de fuentes de sedimentos cercanos se considera la mayor causa de atasco: obras, playas, áreas con terrizos sueltos,... Por lo que la principal medida de mantenimiento debe ser no exponerlo a esas fuentes y protegerlo en caso de estar expuesto temporalmente.
Pezzaniti et al. (2008) observan

Despues de varios años	Capacidad de infiltración (mm/h)		Ks (Saturated Hidraulic Conductivity) (m/s)		Fuente
	min	max	min	max	
Superficie impermeable	0	10	**0**	**10**	Wessolek, 2005
Pavimentos permeables	0				
Adoquines con Juntas filtrantes	50	42840	0,00175	0,0119	Bean et al. 2003; Drake et al., 2013
Asfalto y hormigones porosos	0	18000			Bean et al. 2003; Drake et al., 2013
Con vegetación (+50%)	50	250	0,00175	0,0135	Bean et al. 2003
Con grava (+50%)					
Limite legal en Alemania	194,4		**0,000054**		Starke et al. 2010
Límite legal en Holanda	97,2		**0,000027**		Lucke et al. 2013
Pavimentos tradicionales					
Adoquín de menos de 8cm - Desarrollo de musgo	6,2	12		1,9444E-05	Wessolek, 2005
Adoquin madrileño	-	-			
Adoquin 13% juntas - Desarrollo de malas hierbas	10	126		0,000035	Wessolek, 2005 Starke et al. 2010
Juntas con mortero de cal	-	-	-	-	
Ladrillo con mortero de cal	-	-	-	-	

Tabla B.16: Porosidad y Conductividad hidráulica de pavimentos antiguos

decrecimiento - en un periodo de tres años- de la conductividad hidráulica de 2500 a 400 mm/h en un tipo de pavimento y de hasta 0 en otros. Este estudio asegura que el *clogging* se produce de forma mas relevante por arena gruesa y materia orgánica y otros (Pratt, 1995; Bean,...) donde hay partículas finas.

Lucke et al. (2013) realizan un estudio sobre distintos pavimentos permeables en Australia y Holanda y su capacidad de infiltración después de entre 2 y 10 años. Observan que menos de la mitad tienen el mínimo exigible por ley en ese periodo.

Las técnicas de mantenimiento que se utilizan son:
-Aspiradora de vacío *(Vacuum sweeper)*
-Limpieza a alta presión
-Eliminar los 15-20 mm superiores de las juntas en áreas de tráfico ligero o 20-25 en áreas de tráfico denso (Bean et al. 2013)
Sin embargo, estas técnicas no son siempre efectivas (Bean et al. 2013, Pezzaniti et al. 2008). Aunque de forma global se admite que aumentan la infiltración a largo plazo.

Scholz (2005) asegura que este fenómeno no se produce en los pavimentos de adoquines con juntas filtrantes. Se apoya en en los estudios de Bean et al. (2013) donde se observa que globlamente resisten mejor el paso del tiempo. Sin embargo otro estudio si que observan este fenómeno (Lucke et al. 2009).

Wessolek (2005) también reúne datos no no sobre pavimentos permeables sino sobre superficies genéricas de PT. En ella deduce que la formación de musgo en las juntas influye negativamente en la infiltración -respecto de la vegetación.

Según los tipos de superficies

Se suele considerar la infiltración -a efectos de medida- como complementaria a la escorrentía. (i.e. el agua que no discurre, se infiltra) teniendo en cuenta que parte de la evaporación se produce a mayor plazo que estos dos fenómenos.

PP

Los PP tienen una infiltración muy alta. Cada país marca una distinta que define la diferencia entre permeable y no permeable. Alemania $5{,}4 \times 10^{-5}$ m/s y Holanda $2{,}7 \times 10^{-5}$ m/s (194,4 mm/h y 97,2 mm/h respectivamente). En el caso de Alemania, esta tasa se fija para que sea capaz de soportar una tormenta de 10 minutos que se repite de media cada 5 años. Tienen un gran reservorio para infiltrar o acumular agua. Por ello son los pavimentos más adecuados para la recarga de acuíferos y para la disminución de la escorrentía pico, en episodios extremos y lluvias torrenciales.

Un artículo de Hollenbeck et al. (2013) para un pequeño desarrollo urbano en la misma ciudad permite evaluar la capacidad de estos suelos para ocuparse del conjunto del drenaje de agua de lluvia. Determina que es posible -en esa zona y con unas condiciones determinadas- incluso llegar a tasas de infiltración superiores a las del lugar de referencia. También, pueden ser utilizados combinándolos con redes de drenaje convencionales. Pueden recoger el agua de hasta 4 veces su superficie.

PT

Los PT pueden tener una infiltración bastante alta: más de 70 mm/h -aunque no es comparable con los PP-. Sin embargo con el tiempo, esta también puede disminuir (Wessolek, 2005). Es alta cuando está seco, y disminuye muy rápidamente según se humedece, (ver Fig . B.15) y depende del material de las juntas. En general puede ser inferior a los 10 mm/h. En estos suelos como norma general también influyen de forma importante el tamaño de las juntas: cuanto mayores juntas, menor escorrentía superficial *(Environmental Atlas de Berlín)*.

Terrizos

Los terrizos también pueden tener una infiltración alta, aunque tampoco es comparable tampoco con los PP. Depende mucho de la granulometría del suelo. Si tiene muchas arcillas puede llegar a ser nula. Son muy susceptibles a la erosión. Es alta cuando está seco y disminuye muy rápidamente según se humedece. Cuanto mayor es la cantidad de gravas mas aumenta su capacidad de infiltración. Su comportamiento depende también de su forma.

Alcorques

Los alcorques, por su posición en depresión en la acera, se ocupan de recoger el agua de escorrentía. Su infiltración es alta. Sin embargo, están drenados en la parte inferior por lo que no contribuyen a la recarga de acuíferos. Suelen estar muy compactados y pueden estar cubiertos por una "costra" impermeable.

Reducción de Escorrentía - Infiltración

Aproximación por tipos de pavimentos

Este apartado trata de, según los datos obtenidos, y las dinámicas generales que reducen o pueden reducir la escorrentía, realizar una **hipótesis** sobre la reducción de escorrentía de los distintos tipos de pavimentos.

En esta hipótesis se tienen en cuenta los datos obtenidos en distintos estudios, los condicionantes físicos y tectónicos de los distintos materiales y, en el caso de los alcorques, las condiciones de contexto -considerando que generalmente se encuentran en una zona de mayor depresión respecto de la acera y la calzada por lo que no pueden producir escorrentía sino es en condiciones de compactación extrema y de lluvias muy intensas, algo que no sucede por defecto en los pavimentos permeables.

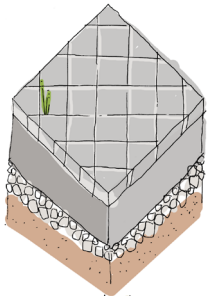
Para realizar este estudio, sería necesario realizar estudios sistemáticos en Madrid -teniendo en cuenta su clima- y en un contexto urbano.

Sin embargo con los datos recopilados se pueden extraer algunas conclusiones. Es necesario evaluar los distintos problemas y condicionantes que puede tener un pavimento para poder proponer alternativas o avances, tanto en el diseño del contexto urbano como de la superficie.

Condiciones de contexto

Las condiciones de contexto hacen variar de forma significativa el funcionamiento del pavimento. Según su posición relativa respecto de la red hídrica, el tipo de suelo que tenga debajo, la intensidad de la lluvia, la pendiente, puede variar de forma significativa su funcionamiento.

Superficies de referencia



Losa de hormigón o asfalto

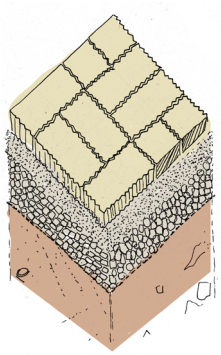
Suelo "pristino"

- ++

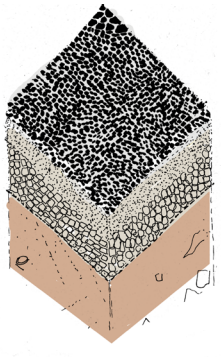
Reducción de escorrentía

> Cuanto más pequeñas son las piezas mas juntas y cuantas mas juntas mas agua se infiltra, según AGU 1988. (en el caso de los PT)

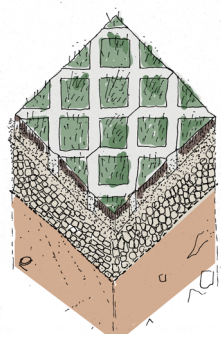
pavimentos permeables (PP)



Adoquines con juntas filtrantes



Asfalto y hormigón poroso



Celdas de plástico o de hormigón

< Los PP son sin duda los pavimentos que mas agua permiten infiltrar en el suelo.

Los alcorques > retrasan la incorporación de agua, pero no infiltran agua en el subsuelo., porque incorporan un drenaje.

intensidad de la lluvia → escorrentía

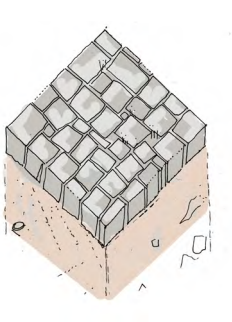
aumento de la pendiente → escorrentía

rugosidad de la superficie ← escorrentía

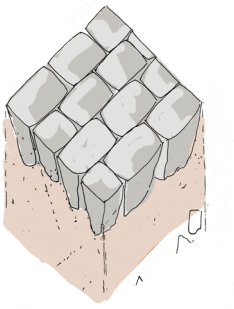
permeabilidad de la superficie ← escorrentía

presencia de vegetación ← escorrentía

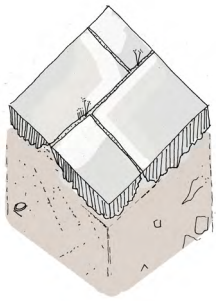
pavimentos tradicionales (PT)



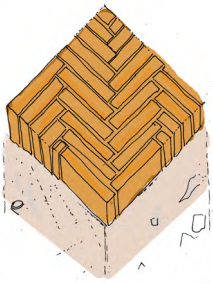
Adoquines o piezas de menos de 8 cm



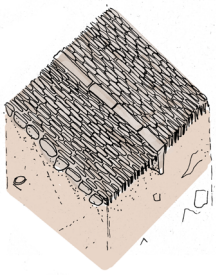
Adoquin madrileño o tamaños intermedios



Losas o piezas grandes



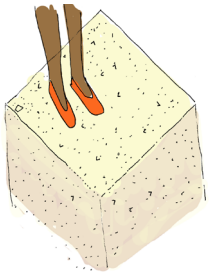
Piezas cerámicas



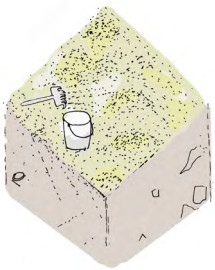
Cantos de morro

terrizos

Terrizos con mezclas arcillosas compactas

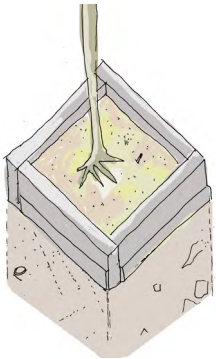


Terrizos arenosos

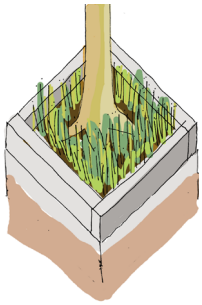


Arenas

alcorques



Alcorques sin vegetación



Alcorques con vegetación

Evapotranspiración

Definición

La evaporación es el fenómeno de cambio de estado de agua de estado líquido a gaseoso. Para que el agua se evapore es necesario que sea retenida por la superficie del material o por la base arenosa. No es sólo una parte del balance hídrico, sino como proceso endotérmico también forma parte del balance energético. La evaporación conlleva la transformación de calor sensible en calor latente, por lo que tiene un efecto refrigerante. Con bajas tasas de evaporación, muy poco calor sensible se transforma en calor latente: éste es uno de los principales efectos de la isla de calor (Asaeda et al. 2000).

La transpiración es la evaporación de agua en la superficie de los organismos que viven en tierra. La evapotranspiración se define como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. (Wikipedia, "Evapotranspiración").

El material de la superficie de pavimentación, la junta y el material de la junta influencian principalmente las tasas de evaporación (Starke et al. 2010).

La capacidad para retener el agua de un material, -definida por su "wrc"- *Water retention capacity* o Capacidad de retención de agua - es la cantidad de agua que puede ser acumulada por un material en contra de la gravedad. Esta propiedad esta muy relacionada con el tamaño de los poros del material -Ver Primera parte-. Se asume que para ello un material tiene que tener capilares de tamaño menor de 10 µm.

Es posible distinguir entre dos tipos de evaporación: la "inmediata" que se produce después de llover en las superficies impermeables al calentarse, y la "lenta" que se produce en los días siguientes a los episodios de tormenta en los materiales que tienen capacidad para retener el agua.: i.e. las mezclas de arenas, limos y arcillas, algunos materiales cerámicos, y por supuesto, vegetación. La "inmediata" depende mucho de la temperatura de la superficie y de la capacidad de infiltración.

El uso de esta propiedad de algunos materiales cerámicos es controvertido en el caso de los suelos ya que puede ser peligroso para el viandante. Sin embargo, sería interesante considerar si la capacidad de retención de agua de las tejas "viejas" -visible en el establecimiento de comunidades vegetales sobre las mismas- podría transformarlas en una forma de SUD.

Para que la evaporación se produzca, es necesario que exista exposición al viento y a la radiación solar (Starke et al. 2010), por lo que en el caso de los PP -sin vegetación- será menor -proporcionalmente al agua retenida- que en los tradicionales y en los terrizos.

Es imprescindible tener en cuenta la vegetación para poder evaluar la evapotranspiración.

Según los tipos de suelos

Superficies impermeables

En superficies impermeables, la evaporación se caracteriza por ser seguir procesos cortos de alta evaporación en los momentos siguientes a la lluvia (Gobel et al, 2010). Esto, en ciudades como Madrid, permite que la bajada de temperaturas -ligada a cierto confort higrotérmico- se produzca de forma puntual después de los eventos de lluvia, pero no permite hacer descender la temperatura en los días siguientes a las lluvias.

	Tasa de evaporación mm/a	Conversión a factor	Porcentaje respecto de las precipitaciones totales	Fuente
Superficie impermeable	**62**	**1,0**	**7%**	Gobel et al. 2013
Pavimentos permeables				
Adoquines con Juntas filtrantes	149	2,4	18%	Gobel et al. 2013
Asfalto y hormigones porosos	96,5	1,6	10%	Gobel et al. 2013
Otros materiales porosos con aglutinantes				
Con cesped (+50%)	545	8,8	65%	Gobel et al. 2013

Tabla B.16: Evaporación anual según tipo de superficie de PP, en el clima de Munster -Alemania-.

PP

De forma similar, los PP -sin vegetación- tambien muestran un patrón de secado y evaporación rápida, al no estar el agua almacenada en los poros directamente expuesta a la radiación solar y al viento -factor muy relevantes para la evaporación. (Gobel et al, 2010). Sin embargo, la cantidad global de agua es mayor que la las superficies impermeables.

Los PP con vegetación muestran una evaporación entre 4 y 6 veces mayor que los demás. Los PP de piezas muestran una evaporación algo mayor que los porosos. Esto parece indicar que en estos casos, la evaporación se ve impedida o disminuida por las capas superficiales de suelo.

Un PP con vegetación no es comparable con un suelo natural, ya que impide el ascenso de agua por capilaridad. Por esta razón se puede suponer que la evaporación -en un periodo de tiempo largo- es mayor en un suelo natural que en un PP con vegetación.

Pavimentos tradicionales

Los PT se apoyan sobre suelos compactados expuestos a la radiación solar y al viento, por lo que en teoría, deberían tener unas tasas de evaporación mayores que los pavimentos permeables, respecto del agua captado. Por el momento no se conoce ninguna investigación sobre este tema.

Sin embargo, según los estudios de Asaeda et Ka (2000), los pavimentos tradicionales de ladrillo o cerámicos, parecen tener unas tasas de evaporación mas altas y un comportamiento particularmente evaporativo -algo que no sucede en los materiales klinker cerámicos-.

Es importante destacar que las superficies capaces de retener la humedad y evaporarla pueden ser una opción viable para disminuir el agua de escorrentía en las zonas urbanas donde no se desee o no sea posible infiltrar agua en los niveles inferiores, favoreciendo una mejora del clima y una disminución de la escorrentía.

Conocer estas tasas podría llevar a comprender si el balance hídrico en suelos compactados es tal que el suelo está mas seco que si estuviera "impermeabilizado": la cantidad de agua evaporada es mayor o igual a la infiltrada, como parece indicar los estudios de Morgenroth et al. 2009.

Esto confirmaría la tesis de Miguel Sobrino -cantero- . Recomienda el uso de PT en el entorno de edificios donde hay ascenso de agua por capilaridad, ya que se observa que la impermeabilización no permite evacuar agua por evaporación.

Además, este fenómeno puede disminuir de forma significativa las temperaturas como se verá en el siguiente capítulo.

Pavimentos con vegetación

Sean cuales sean las bases o el suelo bajo el pavimento es necesario recordar que la vegetación, a través de procesos de transpiración, asegura periodos de evaporación constantes.

El problema en un clima de Madrid es que puede llegar a ser tal que en verano las plantas se sequen, necesitando o bien de riegos adicionales o bien de una siega.

Acercamientos que consistan en mantener especies pioneras o "malas hierbas" durante los periodos húmedos pueden mejorar mucho la evaporación, sobre todo en casos en que existan juntas capaces de cubrirse de vegetación.

Una superficie aislada de vegetación puede contribuir al clima urbano, pero es conveniente plantearse si es comparable a la evaporación que se produce en un árbol en términos de afección al macro clima.

Terrizos

Los terrizos evaporan mas o menos agua según la distribución general de poros y el tamaño de los mismos. Esta, respecto de un suelo natural es reducida, ya que la compactación elimina o reduce los capilares. Por otra parte, una visita a un parque a primera hora de la mañana permite percibir mayor humedad en las zonas de terrizo que en las impermeables.

Suelos "naturales"

En los suelos naturales, el agua asciende por capilaridad, desde las capas mas profundas a las capas superficiales. La presencia de materia orgánica aumenta la capacidad de retención de agua en el suelo.

Temperatura

La isla de calor urbana - o diferencia de temperaturas entre la ciudad y el medio rural cercano- está intrínsecamente relacionada con el sellado del suelo y con todas sus consecuencias. Puede alcanzar hasta 10ºC de diferencia con su entorno (Tumini, 2012).

El aumento de la temperatura afecta directamente a la economía (Tumini, 2012), a la vitalidad del espacio público (Tumini, 2012; Gehl, 2018) y al consumo energético, sobretodo el empleado en refrigerar. (Tumini, 2012; Santamouris et al. 2001).

Se debe esencialmente a cuatro causas:
-la reducción de superficies con altas tasas de evapotranspiración (superficies porosas y vegetación)
- la diferente respuesta a la absorción de los rayos solares (reflectividad, absorción, inercia térmica....)
- el calor de actividades de origen antrópico
- la contaminación atmosférica y el efecto invernadero (Tumini, 2011).

En las zonas urbanas las temperaturas de las superficies son entre 10 y 15º C mayores que las del aire, mientras que en entornos rurales son entre 5y 10ºC; pero esto varía de forma estacional, y es particularmente grave en episodios de calor extremo.

Existen varias estrategias para reducir la isla de calor. Una de ella consiste en el uso de la vegetación. Puede disminuir hasta un 15-35% la demanda de refrigeración o hasta un 50% en algunos contextos (Tumini, 2008). Otra de ellas es la selección de materiales. Entre ellos se distinguen los *cool materials* -que tienen una albedo alto (porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma (0 negro, 1 blanco)) - y una baja emisividad (número adimensional que relaciona la habilidad de un objeto real para irradiar energía térmica, con la habilidad de irradiar si éste fuera un cuerpo negro (1 negro 0 blanco))-.
Pintar un material de blanco puede significar diferencias de temperatura de hasta 45ºC en algunas superficies (Tumini, 2008). Sin embargo, la alta reflexión puede producir problemas de deslumbramiento en las superficies.
La evapotranspiración como proceso endotérmico produce una transferencia de calor sensible en calor latente , alrededor de

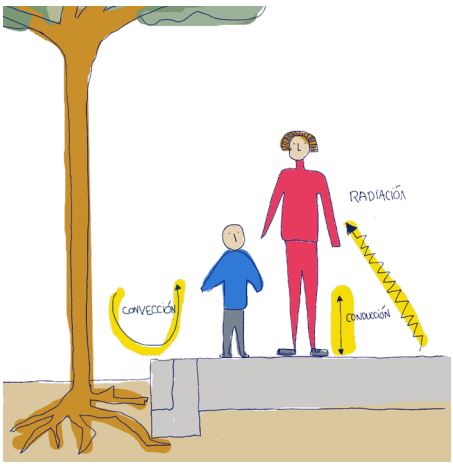


Figura C.01: Procesos principales de transferencia de calor desde el pavimento al cuerpo humano (Adaptado y transformado de Tumini, 2008)

2324kJ/kg de agua evaporada (Tumini, 2008), y se estima que un árbol adulto puede llegar a transpirar mas de 350 l/día.

Pavimentos y isla de calor

En este caso se trata la influencia de las superficies del suelo urbano en la transferencia de calor. Estas son: conducción desde el suelo a las personas, radiación desde el suelo, y convección del suelo al aire. La conducción -que crea un ambiente caliente en los pies de los paseantes- es particularmente importante en el confort e implica la necesidad de "superficies" continuas que alcancen temperaturas mas bajas que los suelos impermeables.

Influencia del contexto y del momento del día

Además del tipo de material: existen dos elementos claves que modifican la temperatura de las superficies urbanas:
-la exposición al sol o a la sombra
-la variación durante el día.
Estas características así como el color (albedo y emisividad) pueden tener mas importancia que el tipo de material.

Sol y Sombra

Aunque esta gráfica no permita establecerse una idea precisa del aporte a la temperatura urbana de distintos tipos de superficies ya que no se tienen en cuenta los niveles de humedad ni otros elementos de contexto, permite hacerse una idea de la importancia de generar espacios de sombra, y de que esto puede tener un mayor impacto en las

temperaturas del suelo que el mismo material.

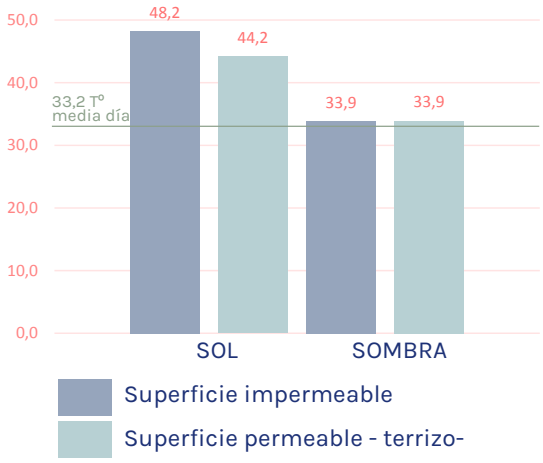


Figura C.02: Influencia del sol y de la sombra durante el día en superficies permeables e impermeables- temperaturas una jornada calurosa (Según datos de Sanz, 2016)

En el estudio de la isla de calor, por otra parte, es necesario evaluar tanto el comportamiento de los materiales durante el día como durante la noche- isla de calor nocturna. En este segundo, la capacidad de un material para "recuperar" la temperatura del aire es muy importante.

Tipos de porosidad

Materiales con arenas, limos y arcillas o materia orgánica

Todos los pavimentos estudiados tienen elementos en común: son transpirables y no sellan el suelo por completo. Sin embargo, no todos tienen el mismo comportamiento.

Los suelos desnudos o cubiertos con vegetación (terrizos, alcorques, juntas arenosas con materia orgánica, PP con vegetación) emiten calor sensible sólo durante el día, y durante la noche, cuando paran de recibir radiación solar, enfrían rápidamente la atmósfera (Asaeda et al,1992). Durante el día, el calor favorece la formación de vapor en los poros, lo que disminuye la conductividad del suelo, por la noche, este vapor condensa, aumenta la conductividad y favorece la evacuación rápida del calor acumulado en el suelo. Por ello contribuyen menos a la isla de calor urbano que otros materiales. Las medidas de temperatura de Estibaliz Sanz (TFM, 2016) parecen indicar lo mismo. Sin embargo, las "arenas" utilizadas en areneros - con gran presencia de poros grandes- muestran un comportamiento similar al que se estudia en los PP: temperaturas mayores a los asfaltos durante el día en contexto de aridez ambiental, y menores durante la noche y durante el día después de episodios de lluvia

PP

Por lo general, los pavimentos permeables tienen temperaturas menos extremas que los pavimentos asfálticos (Mullaney et al., 2005), sin embargo, esto varía en condiciones de aridez y según su material. Asaeda y Ca (2000) realizaron un estudio sobre la variación de las temperaturas en distintos PP respecto de una superficie de pavimento con césped y una superficie de asfalto normal, tanto en la superficie como en las capas subsuperficiales. Probaron dos categorías que organizaron en dos tipos: Bloques porosos y bloques cerámicos.

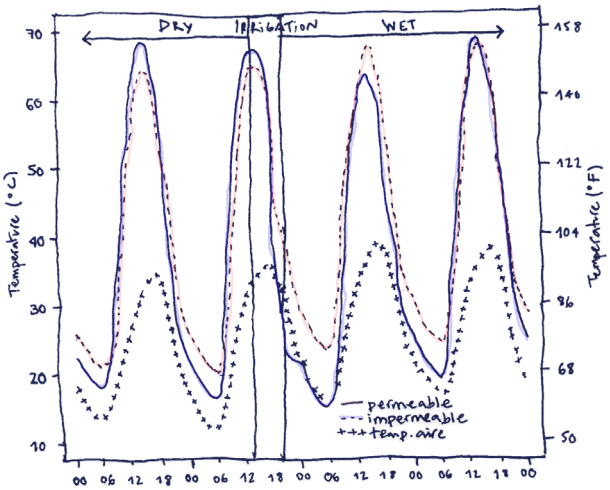


Figura C.03: Comparación de temperatura entre superficies porosa y no porosa con mismo albedo y misma emisividad (elaborada sobre gráfica de H Li et al, 2013)

Estos experimentos se llevaron a cabo en la ciudad de Kuki, a 70 km de Tokio, ciudad de clima templado, con una humedad relativa alta.

Los bloques de asfalto poroso, que permitían una infiltración rápida del agua en el suelo gracias a grandes poros, no retenían este agua y se secaban rápidamente después de la lluvia. A pesar de tener una reflectividad ligeramente mayor que los bloques cerámicos, (0,25 y 0,24 respectivamente), se observó que a mediodía la temperatura de la superficie de bloques de asfalto poroso fue 10 grados mayor que la de los bloques cerámicos. Gran parte de la radiación absorbida fue empleada en calentar la superficie y este calor fue transmitido a las capas subsuperficiales, que adquirieron una mayor temperatura que las del asfalto, es decir que se acumuló

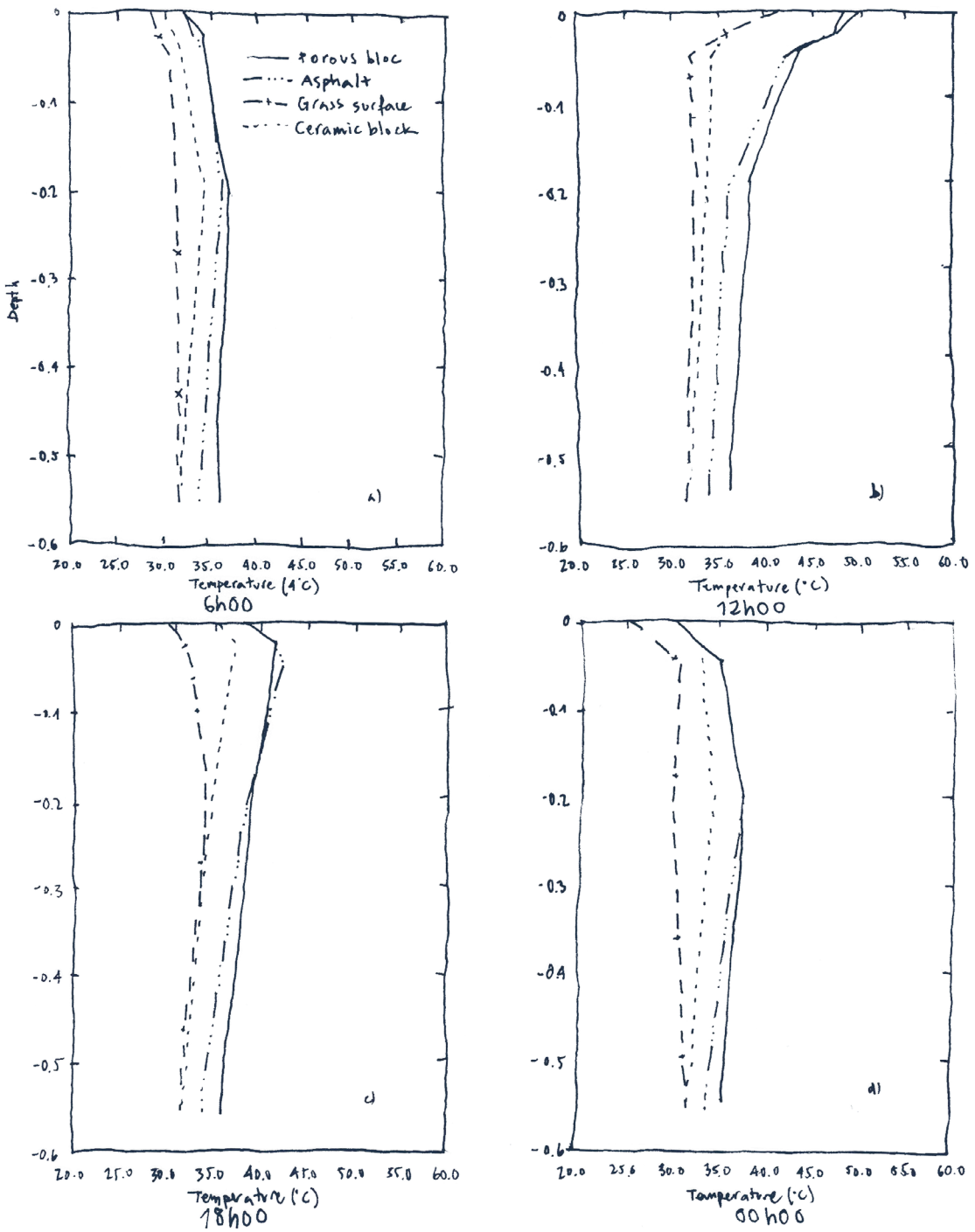


Figura C.04: Evolución de la temperatura bajo diferentes superficies a distintas horas del día (Asaeda et Ka, 2000)

más calor bajo los bloques porosos que bajo el asfalto. Esto provocó que durante la noche la temperatura superficial de estos bloques fuera mayor o igual que la del asfalto impermeable.

En el experimento llevado a cabo por H Li et al. (2013), -sobre bloques asfálticos, asfaltos porosos y piezas de hormigón con juntas filtrante, respecto de sus homólogos impermeables- encontraron comportamientos similares. En un contexto de sequía, la superficie porosa se mantenía mas caliente durante el día, aunque mas fría durante la noche que la superficie impermeable, mientras que, después de un una irrigación se observó como su temperatura durante el día era mas baja que la de la superficie impermeable (Figura C.03).

En resumen, en condiciones de sequía y temperaturas extremas, este tipo de suelo no supone ningún avance respecto de los pavimentos impermeables durante el día, incluso pueden llegar a calentar el suelo y el aire.

Sin embargo, durante la noche mitiga ligeramente la isla de calor. Sería necesario estudiar el efecto de este fenómeno en un clima seco como el de Madrid, donde es común que se den varios días sin lluvia y donde existe una gran sequedad ambiental.

Pavimentos con vegetación

En el experimento de Asaeda et al. (2013), la temperatura del césped natural fue la mas baja debido a la fuerte evapotranspiración. También, la baja conductividad térmica del suelo previno el sobrecalientamiento de las capas inferiores del suelo. Este "material" calienta muy poco el aire durante el día y nada durante la noche.

Pavimentos cerámicos

Por otra parte, en el mismo experimento, los bloques cerámicos tuvieron un comportamiento térmico mejor que el de los pavimentos porosos y peor que el del césped. Siempre se mantiene por debajo del bloque poroso, y por encima o incluso igual que la del césped. Este material calienta el aire durante el día y durante la noche, aunque mucho menos que los bloques porosos convencionales.

Según Asaeda y Ca (2000), la diferencia entre los dos tipos de pavimentos permeables reside en el tamaño de los poros. Los poros amplios reducen la presión y evitan la subida de agua por capilaridad, al mismo tiempo que permiten un drenaje rápido. Esto hace que la superficie este seca y no se produzca evaporación. Por otra parte los bloques cerámicos pueden absorber tanto agua de lluvia como recoger la humedad que se evapora bajo el pavimento permeable, hacerla ascender hasta a superficie y mantenerse mas frío.

Otras consideraciones

El grosor de los pavimentos convencionales influye en la temperatura. Cuando mas espesor, menos se pueden regular por el movimiento de humedad bajo la superficie.

Otro elemento importante es el estudio de como varía la temperatura bajo los pavimentos. Los materiales con una mayor conductividad térmica calientan el suelo durante la noche disipan el calor lentamente -y no llegan a refrigerarse. En este caso el retraso de la onda térmica, puede ser un problema, al retrasar el momento de equilibrio con la atmósfera.

Pavimentos retenedores de agua

Tomando en cuenta estas consideraciones, se desarrollan los pavimentos retenedores de agua (Nakayama y Fujita, 2010).

Paradójicamente, estos pavimentos tienen la capacidad de evaporar el mismo agua que los pavimentos permeables de bloques, según las investigaciones llevadas a cabo por Gobel et al. (2013). Santamouris (2013) define tres características principales de los pavimentos retenedores de agua:
-su capacidad para hacer descender la temperatura con lluvia fina o rocío
-la resiliencia para mantener la temperatura después de una lluvia
-durabilidad a lo largo del tiempo

Seis tecnologías -aditivos a los materiales de pavimentación- han sido desarrolladas con este objetivo (Santamouris, 2013)
-Restos de acerías en asfaltos porosos, que representan mejoras de entre 0,3 y 0,6K respecto del asfalto poroso.
-**Polvo de escorias de altos hornos.** Sus temperatura puede llegar a ser 14K mas bajas que un asfalto convencional.
-**Morteros de finos en hormigón poroso**. El resultado de esto es una -relativamente- baja permeabilidad del material (7200mm/h). No hay datos de la temperatura por el momento.
-**Uso de cenizas de fondo de hornos y serrín de turba en hormigón poroso.** Puede llegar a tener temperaturas 18K mas bajas que el asfalto después de la lluvia si bien puede tener temperaturas 9K mayores que el asfalto poroso convencional.
-**Cenizas volátiles muy pequeñas en materiales cerámicos**
-**Restos industriales como materia prima para piezas cerámicas.** La temperatura superficial es de casi 10K menor que la del material seco y casi 25K menor que la del asfalto convencional.

Santamouris (2013) considera que este tipo de técnicas son mas apropiadas para lugares de alta humedad que para lugares secos, sin embargo, el efecto de la evaporación en la temperatura es mayor en climas secos. Es necesario evaluar estas técnicas en ciudades secas como Madrid.

Aumento de la Evapotranspiración Disminución de laTemperatura

Aproximación por tipos de pavimentos

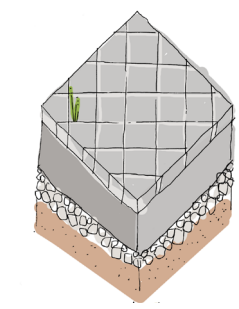
Este apartado trata de, según los datos obtenidos, y las dinámicas generales que reducen o pueden reducir la temperaturas o aumentar la evapotranspiración, realizar una **hipótesis**.

En esta hipótesis se tienen en cuenta la porosidad y el tipo de porosidad y la presencia de vegetación, -es decir, el potencial de evapotranspiración- pero no se tiene en cuenta el Albedo, que depende del color de los materiales. Aumentar la evapotranspiración y la humedad relativa en las ciudades puede ser una forma efectiva de disminuir la temperatura sensible.

En este caso es importante distinguir entre la temperatura de la superficie "pisada" -que influye en la transmisión de calor por conducción, radiación y convección- y la temperatura de las superficies en general -que influyen en la radiación y en la convección-.

Los pavimentos suponen una oportunidad para disminuir la temperatura sensible y mejorar la sensación de confort térmico precisamente al evitar la "conducción" directa de temperaturas extremas a los zapatos y a los piés y evitando quemaduras en las patas de los animales domésticos.

Superficies de referencia

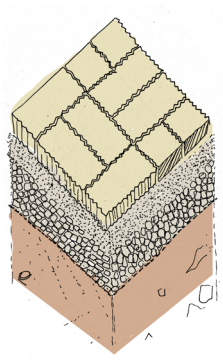


Losa de hormigón o asfalto

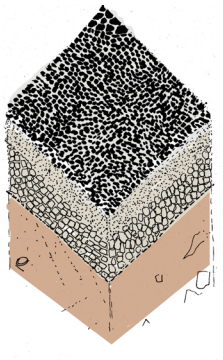
Suelo "pristino"

Reducción de temperatura

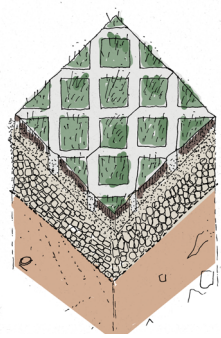
pavimentos permeables (PP)



Adoquines con juntas filtrantes



Asfalto y hormigón poroso



Celdas de plástico o de hormigón

poros inferiores a 10 µm → **disminución de la temperatura**

exposición al viento → **disminución de la temperatura**

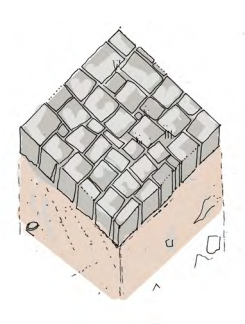
presencia de vegetación → **disminución de la temperatura**

presencia de arenas o gravas → **disminución de la temperatura**

presencia de materia orgánica → **disminución de la temperatura**

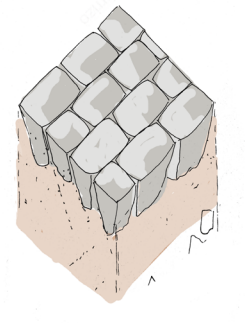
exposición al sol → **disminución de la temperatura**

pavimentos tradicionales (PT)



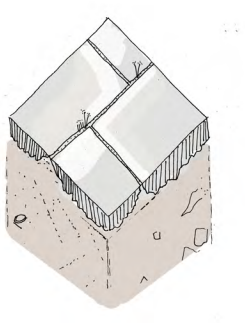
Adoquines o piezas de menos de 8 cm

●●●○○○



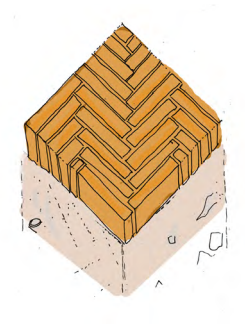
Adoquín madrileño o tamaños intermedios

●●●○○○



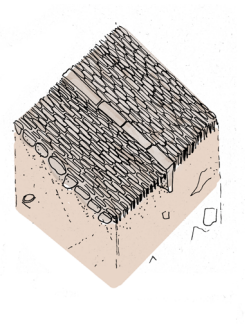
Losas o piezas grandes

●○○○○○



Piezas cerámicas

●●●●○○



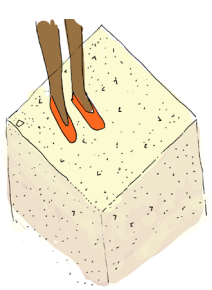
Cantos de morro

●●●●○○

terrizos

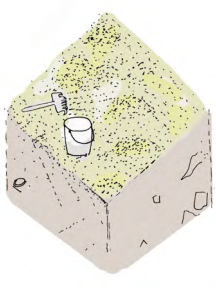
Terrizos con mezclas arcillosas

●●●●◐○



Terrizos arenosos

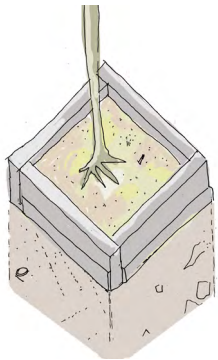
●●●◐○○



Arenas

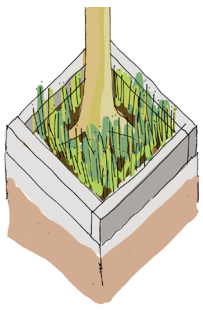
●●○○○○

alcorques



Alcorques sin vegetación

●●●●◐○



Alcorques con vegetación

●●●●●◐

Contaminación

La primera clave para disminuir la afección de los contaminantes en los distintos de pavimentos consiste en reducir y controlar los ditintos de focos de contaminación.

Los distintos tipos de pavimentos estudiados hasta el momento tienen un comportamiento distinto frente a los contaminantes.

Existe numerosa bibliografía que estudia el comportamiento de los pavimentos permeables. Las normas estándares de los distintos manuales aconsejan no infiltrar agua cuando
- existen suelos contaminados
- el nivel freático se encuentra a menos de un metro de profundidad.
- existen actividades potencialmente contaminantes

La contaminación del suelo urbano en zonas de pavimentos permeables o transpirables es particularmente peligrosa si induce a la contaminación de acuíferos o en el contacto directo con las personas (razón por la cual se han eliminado los areneros de algunas áreas de juego infantil de las ciudades).

Conocer la concentración de contaminantes que hay en las aguas de escorrentía de distintas zonas puede dar una idea de la contaminación potencial y puede determinar si es conveniente o no la introducción de un tipo de pavimento.

Al mismo tiempo parece necesario realizar seguimientos del nivel de contaminación e incluso “restaurar” los materiales de pavimento periódicamente si se plantea la introducción de PP o PT a escala urbana. Es previsible que estos tiempos sean tan extensos que en general, antes de colapsar por contaminación, se degraden por su uso y se remplacen o rehagan, eliminando los contaminantes.

Los contaminantes y nutrientes se acumulan en las superficies selladas, y durante los periodos de lluvia se desplazan hacia las juntas o los materiales porosos, hacia los espacios abiertos o hasta las redes de drenaje (Wessolek, 2005).

Retención de contaminantes

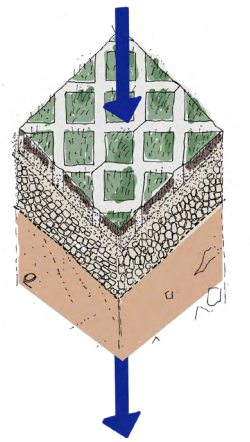
Se han realizado numerosos estudios sistemáticos de la capacidad para retener contaminantes en los pavimentos permeables; sin embargo existe poca bibliografía sobre los PT y los terrizos.
En esta primera parte se definirá la capacidad para retener contaminantes de los PP y después se realizará una hipótesis sobre los demás tipos estudiados.

PP

Los pavimentos permeables filtran los contaminantes y de forma general reducen su concentración (Bean et al. 2007). En general la mayoría de los contaminantes se quedan retenidos en la capas superficiales del pavimento. Este actúa como un filtro mecánico, favorece procesos de sorción y de degradación biológica (Drake et al. 2013).

Eventualmente, la acumulación de contaminantes puede ser eliminada mediante el mantenimiento del pavimento (Drake et al. 2013) -limpiando las juntas o utilizando máquinas de vacío en caso de materiales continuos-.

En algunas pruebas de laboratorio realizado se ha estimado que, en más de 50 años, la concentración de contaminantes en los suelos bajo el pavimento queda bajo el umbral de contaminación fijado por la normativa (Drake et al. 2013).



pH ligeramente ácido
sólidos suspendidos (SS)
metales pesados (MP)
nutrientes
bacterias

pH básico 7 a 9,5
80% menos SS
60% menos MP
contaminantes orgánicos descompuestos

Figura D.01: Principales cambios del agua que atraviesa pavimentos permeables

Contaminantes mas frecuentes de los pavimentos (Scholz et al., 2007)

- Sedimentos y sólidos suspendidos (P y metales pesados)
- Restos orgánicos
- Nutrientes disueltos y contaminantes (nitrógeno, metales pesados, disolventes, herbicidas, y pesticidas)
- Hidrocarburos
- Bacterias

pH

Mientras que la escorrentía y el agua de lluvia suele ser ligeramente ácida, el pH de los exfiltrados suelen ser básicos- algunos estudios dicen que entre 8 y 9,5. Esto favorece la precipitación y filtración de los metales pesados y su transformación en contaminantes menos biodisponibles (Drake et al. 2013). Sin embargo, se considera que para la protección de los ambientes acuáticos mas de 8,5 puede ser perjudicial. Este pH depende de los sustratos tecnológicos con los que se construyen los pavimentos.

El pH del agua exfiltrada depende de los materiales de la subbase y de la acidez de las aguas de escorrentía.

Temperatura y actividad microbiana

La temperatura bajo los pavimentos permeables es siempre mayor que en un suelo "desnudo" (Asaeda et Ka, 2000). Esto aumenta la actividad microbiana y crea condiciones favorables para la degradación de contaminantes orgánicos (Scholz et al, 2007; Drake et al. 2013)

Microbiología

Los pavimentos permeables funcionan como "bio-reactores in situ," y pueden llegar a disminuir la contaminación por hidrocarburos en un 98, 7% (Scholz et al. 2007). Se observan en ellos amoebae, ciliates, flagellates y gymnamoebae. La adición de mezclas microbianas no favorece una mayor biodegradación de hidrocarburos, ya que las comunidades que se desarrollan sin intervención degradan correctamente siempre y cuando tengan suficiente aporte en nutrientes (P y N).

Hidrocarburos

En distintos estudios se observa una disminución significativa de la cantidad de hidrocarburos en los exfiltrados de los suelos respecto del agua infiltrada. La degradación de hidrocarburos se realiza en condiciones aeróbicas, en medios reductores de sulfato, y en sistemas desnitrificantes (Scholz et al. 2007). En distintos estudios se encuentra que en los exfiltrados la cantidad de hidrocarburos es sistemáticamente más baja que de los niveles de detección (Drake et al. 2013)

Metales pesados

Los sólidos suspendidos y los metales pesados se reducen de forma significativa en los pavimentos permeables. La presencia de un ambiente básico (Drake et al.2013) favorece la precipitación de los mismos y los inmoviliza. Sin embargo, esto depende de los materiales y del tamaño de los materiales de las juntas. Si los poros son

Porcentaje de contaminantes eliminados en el agua de infiltración - en concentración total-

	TSS		Zn		Cu		Pb		Cd		
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	
Pavimentos permeables											
Adoquines con Juntas filtrantes	56		93		57		-		-		Drake et al. 2013
Asfalto poroso	64	94	72	83	35	75	78	93	67	69	Drake et al. 2013

Concentración residual media en el agua exfiltrada

	TSS (mg/L)		Zn (µg/L)		Cu (µg/L)		Pb (µg/L)		Cd (µg/L)		
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	
Pavimentos permeables											
Adoquines con Juntas filtrantes	10	80	8	60	3	8	-	-	-	-	Drake et al. 2013
Asfalto poroso	7,6	23,2	23,3	180	6,8	12,9	0,25	20,3	0,5	0,8	Drake et al. 2013

Tabla D.02: Reducción de metales pesados y sólidos suspendos en lo exfiltrados de los PP (Segun Drake et al. 2013)

demasiado grandes pueden no ser atrapados e infiltrarse directamente en el subsuelo. (Scholz et al. 2007). Por otra parte, además de las primeras capas, los geotextiles pueden separar los microcontaminantes como el cadmio, el zinc o el cobre del suelo, previniendo así la contaminación de los acuíferos. Algunos autores aseguran que los pavimentos permeables reducen como mínimo entre un 50 y un 60% de los metales pesados (Scholz,2005) y en la tabla D.02 se puede observar como se puede llegar a eliminar porcentajes incluso mas altos, de forma a que solo en algunos momentos supere la concentración crítica para aguas superficiales. (Drake et a. 2013)

Cloruros

Los pavimentos permeables no filtran los cloruros. Estos, generalmente, provienen de las sales que se ponen para la creación de superficies resbaladizas. Además, la porosidad de los mismos puede favorecer el deshielo antes que en los pavimentos convencionales, por lo que se recomienda no verter sal en ellos.

Figura D.03: Los cloruros no se retienen en los PP y son una posible fuente de contaminación.

Otros pavimentos

El resto de superficies permeables infiltran una cantidad significativamente menor de agua, excepto los alcorques, que por otra parte suelen llevar un drenaje en la parte inferior.

Aunque por esto sus efectos puedan ser menos nocivos,-en el caso de movilizar contaminantes enterrados- se desconoce su comportamiento de forma sistemática. Se pueden intuir algunos elementos por su sistema constructivo.

Pavimentos de piezas

Es probable que, en los pavimentos tradicionales, los distintos contaminantes se concentren en las juntas y que en estas se filtren los sólidos suspendidos y se degraden algunos de los contaminantes en las capas superficiales. El resto del agua de escorrentía desplazará los contaminantes hacia la red de saneamiento -en particular con el *first flush*-.

Otro elemento a destacar es que es probable que en aquellos pavimentos donde se vierte algo de cal en la capa arenosa, se facilite la precipitación de los metales pesados.

Wessolek, (2005) observa que en las juntas de adoquines existe una proporción $C_{microbiana}/C_{organico}$ extraordinariamente alta, sin embargo, no se ha confirmado que esos altos niveles estén directamente asociados con la degradación de contaminantes orgánicos.

Alcorques

Hasta el momento no he localizado ningún documento que haga referencia a la contaminación en los alcorques, pero puede ser que la contaminación sea alta por la concentración de aguas de escorrentía. El drenaje inferior puede evitar o disminuir la contaminación del subsuelo.

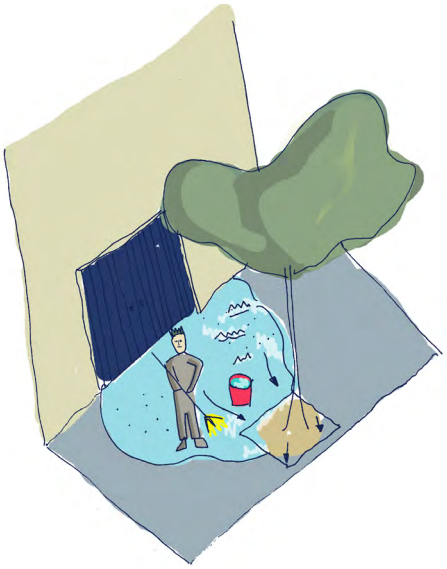


Figura D.04: Los alcorques funcionan como sumidero de la escorrentía y de los contaminantes.

Terrizos

Los terrizos pueden retener cierto nivel de contaminantes. Sin embargo, si están correctamente mantenidos sus tasas de infiltración son bajas. También son foco de contaminación o polvo en periodos de sequía. Esto provoca que generalmente se desaconseje yuxtaponer terrizos y pavimentos permeables, así como regar ligeramente o humedecer estos pavimentos para evitar la deflación en épocas de sequedad ambiental.

Largo plazo

Hasta el momento se han realizado pocos estudios a largo plazo de el funcionamiento de la contaminación en los PP. Sin embargo existen algunas conclusiones. A medida que pasa el tiempo, la tasa de Zinc aumenta, mientras que las concentraciones de Cu y Pb disminuyen (Drake et al. 2013).

Es posible decir que los PP, a largo plazo, actuan como filtro de contaminantes inorgánicos y de metales pesados. Sin embargo, enfocar el diseño de las bases y las subbases - incluso del pavimento- a las formas de contaminantes locales sería una solución óptima para el diseño urbano.

Investigación actual

Además de toda la investigación y medidas que se toman para reducir la contaminación, se puede estudiar de forma complementaria sistemas para inmovilizar o aumentar la actividad microbiana y descomponer contaminantes. Aunque se estén realizando investigaciones sobre de que forma el diseño puede limitar los contaminantes, parece necesario enlazar toda la investigación realizada con tecnosoles con la investigación ligada a pavimentos urbanos.

En particular, se estan estudiando geotextiles, materiales adsorbentes de fosfóro, y la introducción de zonas anaerobias (Drake et al. 2013).
Algunas investigaciones apuntan que los geotextiles pueden captar NH4+, y que las capas de arenas reducen las de nitrógeno. (Drake et al. 2013). Los sustratos con microporos -ladrillo machado- muestran mayor sorción de metales pesados que el basalto (Drake et al. 2013).

Prevención indirecta de la contaminación

En general no se suele destacar, pero estos pavimentos pueden ser una medida remediadora de la contaminación en otros puntos de la ciudad. De la misma forma que una red de drenaje, puede evitar la llegada de contaminantes a zonas donde puedan estar en contacto con población de riesgo; por ejemplo, en el entorno de un parque, donde puedan llegar las aguas de escorrentía al interior del mismo.

La introducción de PP o ampliación de otros materiales capaces de reducir la escorrentía a gran escala puede suponer un descenso de la contaminación en los alcorques o en las áreas no selladas al "repartirla" más y favorecer su degradación o inmovilización.

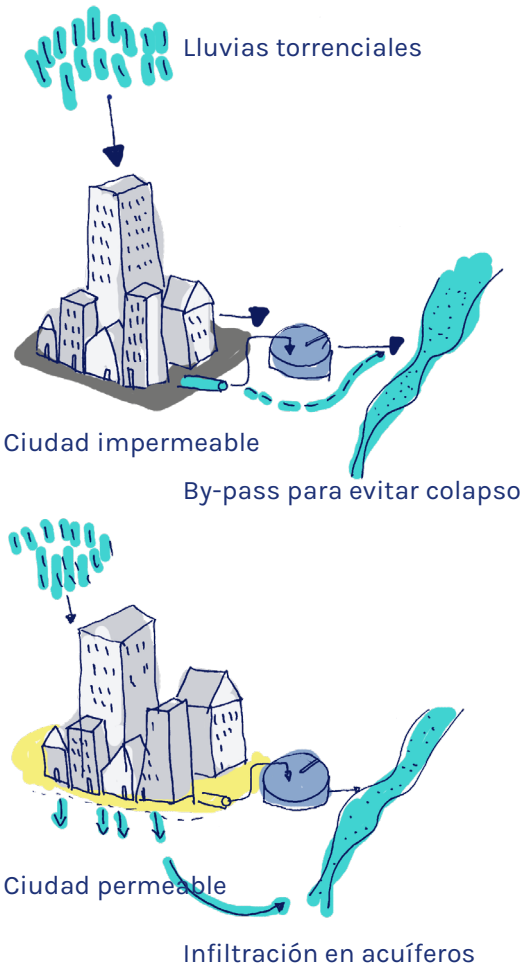


Figura D.05: Mejorar el rendimiento de las redes de drenaje es una medida eficaz para disminuir la contaminación de ecosistemas acuáticos.

Por otra parte, al mejorar el rendimiento de los sistemas de depuración y estanques de tormenta en periodos de lluvias, previene la contaminación de los ecosistemas acuáticos.

Sin embargo, Wessolek (2005) recuerda que en casos de alta contaminación de los suelos el sellado puede ser conveniente.

Capacidad para retener contaminantes del aire

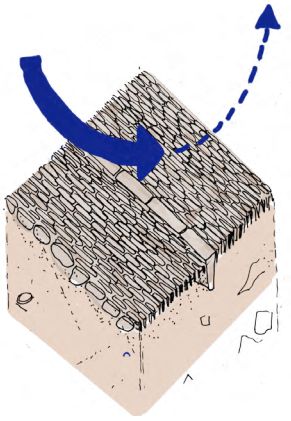


Figura D.06: La rugosidad favorece la captación de contaminantes del aire (AGU, 1988).

Uno de los primeros estudios sobre el impacto y la capacidad ecológica de los distintos tipos de pavimentos (AGU, 1988), realizado por la Universidad Libre de Berlín en los últimos años de la RFA incluye aspectos como la capacidad para retener contaminantes y la capacidad para atraparlos. En este sentido, destaca la importancia de la porosidad para retener contaminantes, y de la rugosidad para atraparlos. Destaca que las características del material del pavimento y de las juntas (% sustancia orgánica y % de material finos) determinan la capacidad de retener contaminantes y determina que cuantas más sustancias orgánicas o sustratos finos, más retención de estos contaminantes. También, sostiene que la eficacia climática para limpiar el aire depende de la vegetación que sustente. Por último, asevera que cuanta más rugosidad hay más limpieza de partículas de polvo del aire.

Por otra parte, en la actualidad se están desarrollado e implantando pavimentos con dióxido de titanio que permiten captar la contaminación del aire y neutralizar mediante "fotocatálisis" algunos contaminantes del aire. Se está introduciendo también junto con algunos PP. Se considera inocuo para la salud u el medio ambiente. Sin embargo, es posible que todavía sea pronto para saber si este tipo de técnicas pueden tener algún efecto en el medio ambiente o en la salud si se implantan a gran escala.

La contaminación como foco de degradación de los pavimentos permeables

Atasco o Clogging

La utilización de PP no está exenta de limitaciones. Una de las mayores, en áreas urbanas y aún mas en climas secos, son el fenómeno de atasco o *clogging*. Los poros que permiten la porosidad se obstruyeny no permiten la infiltración de agua. Estas obstrucciones se deben esencialmente a

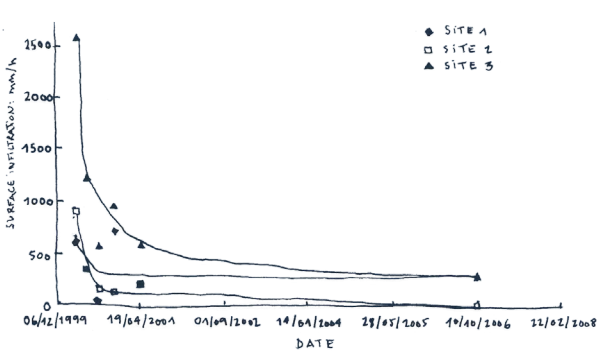


Figura D.07 Evolución de la infiltración por atasco en tres sitios (elaborada sobre gráfica de Pezzaniti et al. 2008)

formas de contaminación atmosférica y a los depósitos de polvo asociados.

Esto disminuye su vida útil, sin embargo, en algunos casos aún es posible infiltrar agua de forma aceptable (con tasas superiores a 90mm/h). La cercanía de focos de emisión de sedimentos aumenta la probabilidad de este fenómeno (Pezzaniti et al, 2008)

Las zonas con mayor tráfico, las zonas cercanas a obras y los lugares con procesos erosivos -i.e. terrizos o zonas arenosas- se ven más afectadas por este fenómeno.

Para limitar el efecto de la obstrucción, se propone el uso de maquinaria que no siempre es efectiva -maquinas de vacío-, por lo que existen bastantes voces escépticas con su uso, sobre todo con los materiales porosos. Se suele preferir el uso de adoquines -cuyas juntas se pueden limpiar de forma períodica, y que mantienen una tasa de infiltración media mucho mayor a lo largo de los años. (Scholz et al 2007, Bean et al. 2000)

Paradójicamente, el crecimiento de vegetación en áreas obstruidas por acumulación de materia orgánica y semillas, puede aumentar la permeabilidad a largo plazo (Drake et al 2013), si esta vegetación no se percibe como nociva para el diseño urbano.

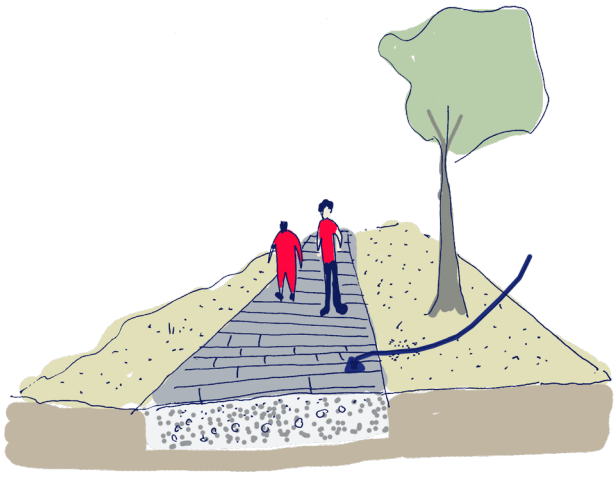


Figura D.08: Los terrizos cercanos a los pavimentos permeables pueden reducir de forma significativa a medio-largo plazo su capacidad de infiltración.

Terrizos, foco de contaminación

Como se ha visto, los terrizos son un contaminante potencial para los pavimentos permeables y para el aire en general de la ciudad. Las partículas finas son desplazadas por procesos de erosión o deflación, y entran en el aire. Dependiendo del material son mas o menos erosionables.

Es recomendable regarlos ligeramente y/ o mantenerlos a la sombra para evitar la sequedad los días mas calurosos del año.

Por otra parte, en la actualidad se están desarrollando modelos para la restauración de espacios mineros -con el programa de ordenador Geo-fluv Natural Regrade- que permite generar "geoformas" estables a la erosión hídrica. Este diseño incorpora una geometría en el diseño de caminos que permite eliminar o reducir significativamente la erosión hídrica. De forma complementaria, sería necesario mantener cierta vegetación en los caminos que permita el pisoteo.

Esta perspectiva, todavía sin desarrollar -debido a que la tecnología es muy reciente- puede generar terrizos mas resistentes a la erosión hídrica y espacios con un mayor valor ambiental.

Figura D.09: Diseño común de camino.

Figura D.10: Diseño de camino o superficie con geoformas. (hipótesis)

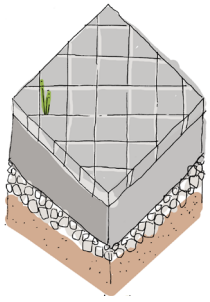
Retención, degradación e inmovilización de contaminantes

Como se ha visto en el apartado anterior, este es un concepto dificil de cuantificar, porque varía en función del tipo de contaminante.

En el caso de los PT y de los terrizos no se han realizado estudios que estimen la degradación de contaminantes, sin embargo en este tipo no es muy peligroso ya que infiltran poco agua en el subsuelo.

Con los datos obtenidos se realiza una hipótesis.

Superficies de referencia

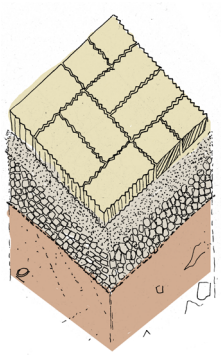


Losa de hormigón o asfalto

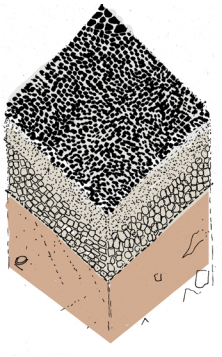
Suelo "pristino"

Retención de contaminantes

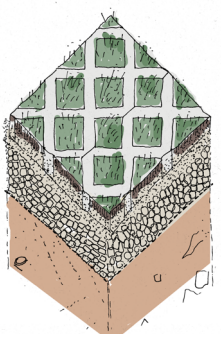
pavimentos permeables (PP)



Adoquines con juntas filtrantes



Asfalto y hormigón poroso



Celdas de plástico o de hormigón

rugosidad → captación y detención de contaminantes del aire

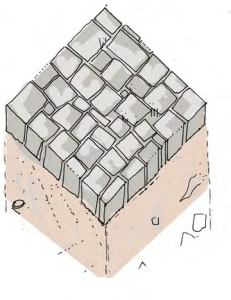
vegetación → captación y detención de contaminantes del aire

actividad biológica → degradacion contaminantes orgánicos

pH básico → inmovilización metales pesados

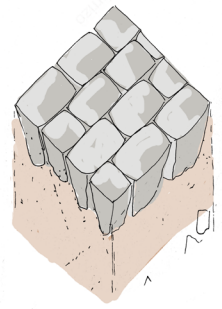
poros pequeños -¿?- → retención de sólidos suspendidos

pavimentos tradicionales (PT)



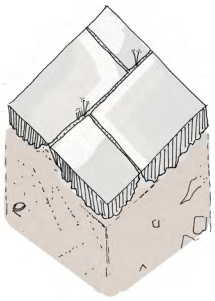
Adoquines o piezas de menos de 8 cm

●●◐○○○



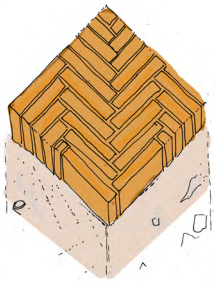
Adoquin madrileño o tamaños intermedios

●●◐○○○



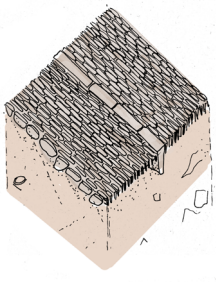
Losas o piezas grandes

●○○○○○



Piezas cerámicas

●●◐○○○



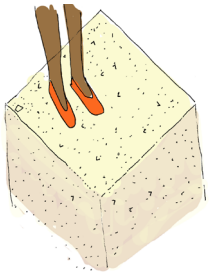
Cantos de morro

●●●○○○

terrizos

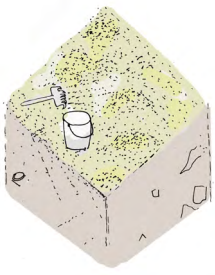
Terrizos con mezclas arcillosas

●●◐○○○



Terrizos arenosos

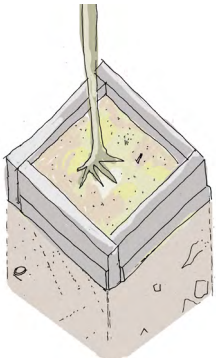
●●◐○○○



Arenas

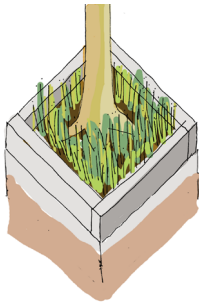
●●◐○○○

alcorques



Alcorques sin vegetación

●●●○○○



Alcorques con vegetación

●●●●◐○

Vegetación y hábitats

El sellado de suelos tiene grandes consecuencias en la fauna y la vegetación, tanto de forma directa -pérdida o modificación de hábitats, barreras físicas o químicas- como indirecta -aumento de temperaturas- (Wessolek, 2005). Sólo algunos animales o insectos -voladores- pueden superar las barreras urbanas -insectos voladores, pájaros y murciélagos- (Wessolek, 2005).

Los distintos tipos de pavimento presentan, por su diseño, distintas especies vegetales y microbianas. Mientras que en los entornos agrícolas el potencial microbiano se comprende como un componente de la fertilidad del suelo, en las ciudades se entienden como una barrera de contaminantes orgánicos (Wessolek, 2005) En lo que se refiere a especies vegetales, se puede observar cómo en las calles –o entornos construidos– se suelen encontrar especies arbóreas, pero prácticamente ninguna herbácea ni ningún arbusto. En general, los árboles urbanos son siempre mas pequeños que en entornos naturales. (Sanders et al., 2014) Existen muchas hipótesis sobre esto: compactación, estrés ambiental, falta de suelo, ..

¿En qué medida el pavimento o el suelo urbano puede favorecer algunos tipos de especies? En un primer momento se estudian los pavimentos que incluyen vegetación en su diseño, y aquellos que —aun sin introducirla voluntariamente— pueden albergar algunas especies. Después, se estudiará que tipos de pavimentos o soluciones pueden facilitar el crecimiento de los árboles.

Pavimentos como soporte de vegetación

En las juntas de los pavimentos se pueden encontrar distintos tipos de vegetación, principalmente herbácea. La vegetación en general puede: mejorar la infiltración, disminuir la temperatura, mejorar la calidad del aire e incluso favorecer la polinización, entre otras.

Sin embargo, en general, las normativas locales prohíben terminantemente el desarrollo de vegetación espontánea, posiblemente al considerarlo como una muestra de descuido.

Paradójicamente, en un estudio en Alemania, los asentamientos urbanos más sellados se perciben como “empobrecidos”, mientras que aquellos que tienen menos áreas selladas se consideran más “ricos” (Wessolek, 2005).

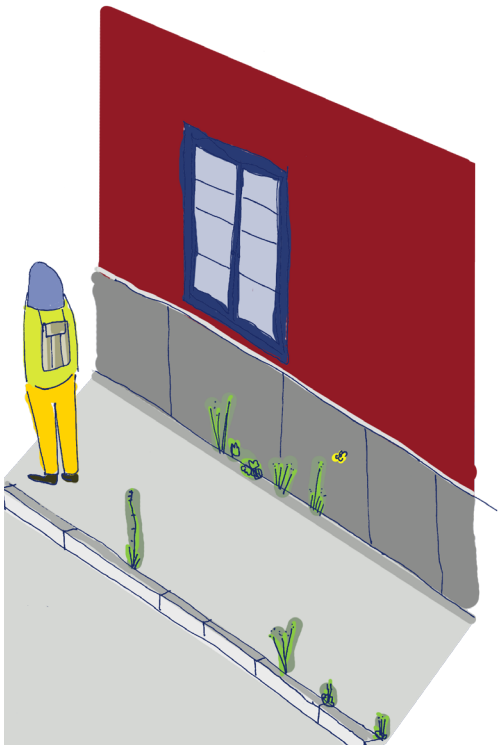


Figura E.01 La vegetación espontánea puede mejorar la ciudad desde un punto de vista ambiental

Vegetación incorporada en el diseño de pavimentos

Dentro de los pavimentos estudiados sólo dos se caracterizan por integrar en el diseño de pavimento vegetación —cantos de morro y PP con vegetación—. En los dos casos albergan distintos tipos de herbáceas. Los PPS con vegetación tienen más de un 50% de su superficie con “topsoil” (generalmente traducido como tierra vegetal), incluso más un 95% en el caso de los acabados con geoceldas plásticas, que queda enrasado con la superficie mientras que los segundos tienen en torno al 20% que queda unos 1-2 cm más abajo. Los primeros son por tanto mas susceptibles a la compactación, a la erosión

y al *clogging* que los segundos. Los primeros se suelen usar con tráfico muy ligero o ocasional, y los segundo son frágiles -por la ausencia de base granular- y se suelen usar en entornos exclusivamente peatonales.

Estos pavimentos se diseñan con vegetación herbácea. La mayoría de artículos (Takebayashi et al., 2007; Novo et al., 2013) que estudian PP trabajan con distintas variedades de césped.

En los suelos de cantos de morro, se añaden semillas, que suelen ser especies pratenses -especialmente cereales o leguminosas -de raíces finas o que no afecten al pavimento-. Sin conocer los motivos de la incorporación de estas semillas en el diseño de pavimento, se pueden suponer varias razones: la creación de un paisaje florido en primavera, el aumento de infiltración por la formación de bioporos, el establecimiento prioritario de comunidades vegetales que no afectan al pavimento -frente a especies leñosas que lo levantarían-, la bajada de las temperaturas por la evaporación y la "presión" entre diferentes piezas para su inmovilización.
Este apartado puede permitir una

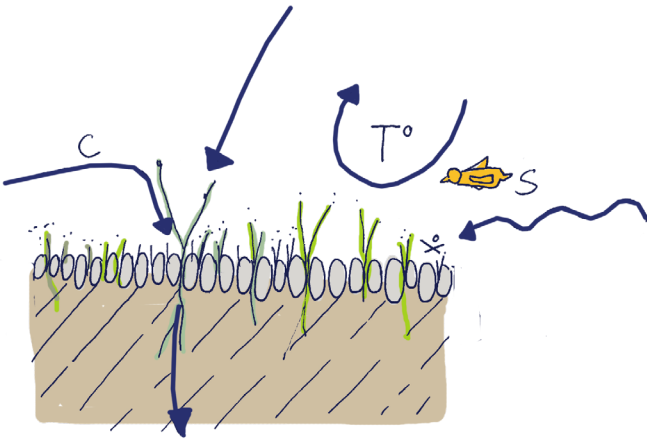


FIgura E.02: Los pavimentos de cantos introducen la vegetación como parte imprescindible del diseño para su cuidado

investigación complementaria ya que el césped en Madrid puede necesitar gran cantidad de agua. La evaluación de la viabilidad de algunas especies de herbáceas autóctonas y de baja altura que pudiesen permitir un diseño que no necesitase riego y que fuera capaz de soportar temperaturas extremas en verano y algo de estrés por pisoteo podría ser una forma efectiva de asegurar un buen mantenimiento de pavimentos que incorporen vegetación en el diseño.

Existen algunas investigaciones que evalúan el uso de especies en cubiertas vegetales en climas mediterráneos o semi-áridos (Gonzálvez del Pino,2014).

Vegetación espontánea

En las juntas o en los poros del resto de pavimentos -arena fina en el caso del pavimento portugués y gravas en los PP, incluso en las juntas de cemento de los pavimentos impermeables-se puede almacenar a lo largo del tiempo restos orgánicos de la ciudad -restos de hojas, polen, etc-, que a su vez favorecen la retención de humedad. Esto favorece la creación de sustratos dónde puede crecer la vegetación espontánea. Wessolek (2005) observa cómo cambian los componentes de las juntas y como aumenta en particular el humus en las capas superiores.

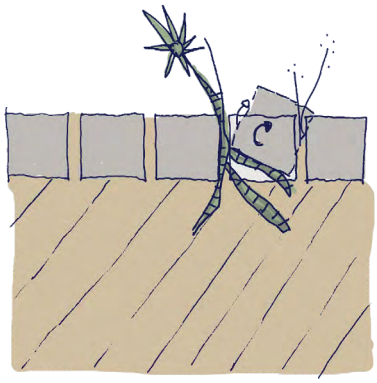


FIgura E.03 Determinadas comunidades vegetales pueden dañar el pavimento

Dependiendo de las raíces de las especies establecidas y del tamaño de pieza se puede dañar o no el pavimento. En ese sentido el adoquín madrileño parece más resistente -por su tamaño y su peso- a distintos tipos de vegetación invasora que el portugués o los cantos de morro.

En los terrizos se suele eliminar sistemáticamente. Sin embargo, proponer sistemas de eliminación selectiva, o incluso mantenerla en espacios “naturalizados” puede favorecer la infiltración y la

biodiversidad y disminuir ampliamente la erosión.

Algunas ciudades, como Nantes, lejos de prohibirlas, las permiten y valoran su presencia como forma del paisaje urbano (El País, 2016). Esta iniciativa, que comenzó por la iniciativa de una ciudadana -Frédérique Soulard- que inscribió en la calzada los nombres de las distintas especies de `malas hierbas´- puede tener un gran impacto a escala urbana. (Mas información en www.frederique-soulard-contes.com/belles-de-bitume)

Figura E.04. Belles du bitume (Proyecto "Belles du Bitume" de Frédérique Soulard, foto de Estelle Michel)

Figura E.05. En Nantes no se cortan las `malas´ hierbas (Foto de Daniel Martorell, www.dmartorell.com)

Diversidad de hábitats

La forma del pavimento influye en la capacidad de favorecer o no cierta biodiversidad en las especies presentes en el pavimento. Por el momento únicamente los estudios de Schulze, Pohl, y Grossman (1984), nombrados en el resumen AGU hacen referencia a la diversidad de hábitas para organismos. No ha sido posible encontrar el estudio original pero se transmiten los resultados transcritos en el documento del AGU (1988)

Las funciones ecológicas que se definen son:
-capacidad para absorber, almacenar, transformar, y liberar agua en estado líquido y gases que puede haber en el ambiente.
-base de la vida para vegetación
-base de la vida para organismos
-función de la fertilidad en un sentido ecológico.

En este estudio destacan la importancia de los poros para albergar diversidad ecológica. Y la importancia de la intensidad de uso: a mayor intensidad de uso menor capacidad ecológica. Realizan una clasificación según tipo de suelos donde determinan la capacidad ecológica de los distintos tipos de pavimentos.

Una norma general de diseño consiste en que cuánta mas rugosidad y diversidad de tipos de espacios y sombras más diversidad de hábitats.

Además destacan como esto son normas variables: cuanto mas vieja es una superficie mayor capacidad ecológica tiene.

Como elementos más destacables consideran que un hormigón sellado y recién realizado tienen una capacidad nula y un suelo sin sellar una capacidad de 1, y que ningún pavimento tiene características comparables al suelo natural.

	Eficiencia ecológica
Superficie impermeable	
Asfalto, hormigón sellado nuevo	0
Asfalto, hormigón viejo	0,1
Pavimenos permeables	
Hormigón poroso	0,2
Hormigón poroso antiguo	0,2
Geoceldas con vegetación	0,6
Pavimentos tradicionales	
Losetas de compuestos artificiales	0,2
Adoquines de tamaño medio grande	0,3
Adoquines pequeños: menos de 8cm	0,4
Terrizos	
Terrizo: muy denso	0,6
Terrizo: menos denso	0,6
Suelo natural sin sellado	1

Tabla E.05 Eficiencia ecologica (AGU, 1988)

Interacción entre pavimentos o suelos y crecimiento de árboles

Distintos factores influyen en el crecimiento de los árboles urbanos: el tráfico, el método de plantación, el lugar de plantación, la compactación del suelo, el nivel de humedad del suelo. En este caso, este documento se centra en la influencia del pavimento y el tratamiento inferior del suelo y su impacto en el crecimiento de los árboles.

Se suele considerar que frente a los pavimentos impermeables, los permeables facilitan el crecimiento de la vegetación, ya que se suele pensar que la falta de agua en el suelo es un factor limitante para el desarrollo de los árboles urbanos y que los pavimentos permeables aumentan esta cantidad (Morgenroth et al. 2005).

Sin embargo, los estudios relativos a la humedad de los suelos bajos los distintos tipos de pavimentos y al crecimiento de los árboles urbanos parecen poner en evidencia otros problemas y desmontar las creencias existentes. En este apartado se explican los distintos condicionantes y limitantes presentes en el suelo y cómo los pavimentos pueden favorecer o limitar el crecimiento de los árboles urbanos. Primero se explican los estudios relativos a la humedad, y después los relativos al efecto de los pavimentos estudiados y finalmente se recorren alternativas relacionadas con la gestión del suelo que favorecen el crecimiento de los árboles.

Humedad

El estudio de Morgenroth et Buchan (2009) compara la humedad y la aireación bajo pavimentos permeables permeables y bajo pavimentos impermeables. Con ello, desmonta un falso mito de que el comportamiento higroscópico de los pavimentos permeables favorece el crecimiento de los árboles.

En la figura E.06. se puede observar como los pavimentos permeables y los impermeables tienen un comportamiento similar entre sí y contienen un contenido de humedad mucho mayor al del suelo “natural”, llegando a producir situaciones de anaerosis.

A lo largo de la temporada seca, en la capa superficial del suelo natural, el contenido en humedad varía de forma abrupta con las precipitaciones y el contenido en agua se sitúa en torno al 27% (+-7%), mientras que los suelos pavimentados tienen una humedad estable que disminuye progresivamente - de 45% a 32%-.

De este primer análisis se puede deducir que, en el caso de los suelos impermeables y de los PP, se producen fenómenos de condensación en las capas superficiales bajo el pavimento. Se realiza una hipótesis que consiste en que el vapor de agua migra hasta encontrarse con las barreras superiores -más frías a ciertas horas del día- y se condensa. El pavimento produce una barrera que hace que el aire no esté directamente en conexión con la atmósfera.

Un análisis más detallado, a distintas profundidades -5,10 y 20 cm- de los niveles de humedad permite observar como en un suelo natural existe mayor humedad en las capas mas profundas, mientras que en los pavimentos impermeables la mayor humedad esta en la capa intermedia y en los permeables esta última tiene el menor contenido de humedad y la superficial el mayor. Esto muestra que, aun teniendo comportamientos similares, algunos elementos son diferentes. Sin embargo, los pavimentos permeables no permiten una mejor aireación que los impermeables -solo la permitirián si no compactasen los suelos.

Este experimento se realiza en Christchurch, una ciudad neozelandesa al borde del Océano Pacífico, por lo que entendemos que existe una humedad ambiental mayor que en Madrid.

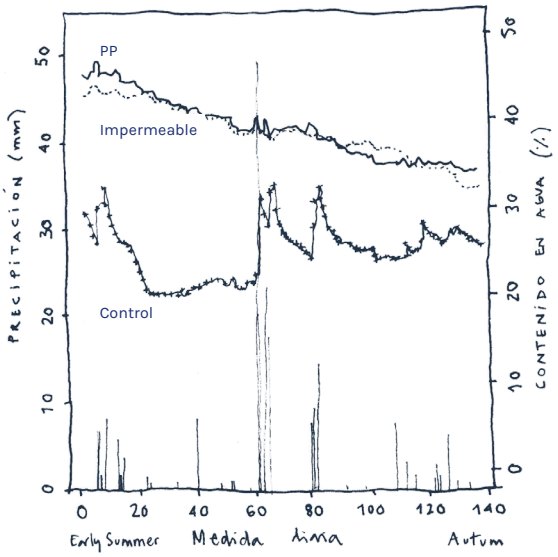


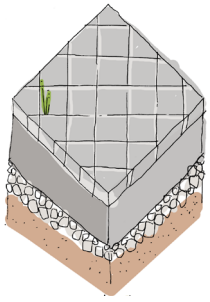
Figura E.06: Variaciones en el de humedad del suelo bajo pavimentos permeables, impermeables y sin pavimento (elaborado según gráfica de Morgenroth et al, 2009)

Eficiencia ecológica

Este concepto reune varios elementos estudiados en otros capítulos (primer punto) y los elementos estudiados en éste (tres últimos puntos).
Las funciones ecológicas que se definen y cuantifican son:
-capacidad para absorber, almacenar, transformar, y liberar agua en estado líquido y gases que puede haber en el ambiente.
-base de la vida para vegetación
-base de la vida para organismos
-función de la fertilidad en un sentido ecológico
Datos según AGU 1988 e hipótesis continuando el mismo razonamiento.

Superficies de referencia

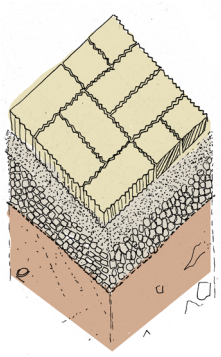
- ++
Reducción de temperatura



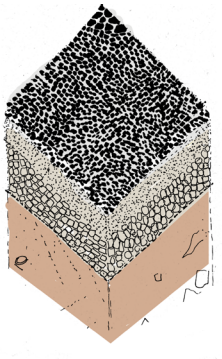
Losa de hormigón o asfalto

Suelo "pristino"

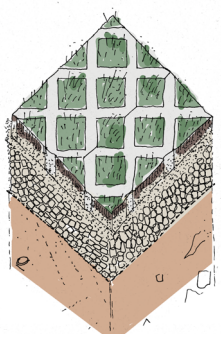
pavimentos permeables (PP)



Adoquines con juntas filtrantes



Asfalto y hormigón poroso



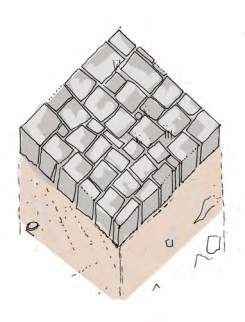
Celdas de plástico o de hormigón

poros de distintos tamaños → **hábitats**

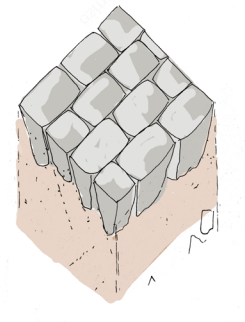
vegetación → **habitats**

tierra vegetal → **fertilidad**

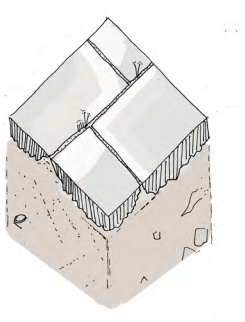
pavimentos tradicionales (PT)



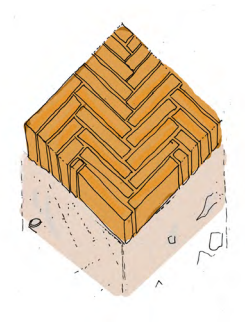
Adoquines o piezas de menos de 8 cm



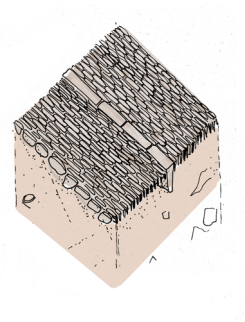
Adoquín madrileño o tamaños intermedios



Losas o piezas grandes

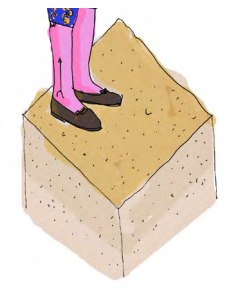


Piezas cerámicas

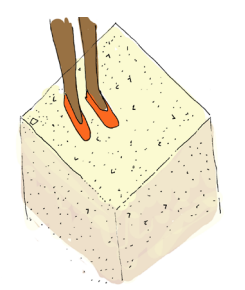


Cantos de morro

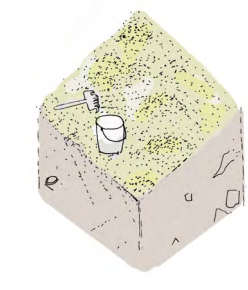
terrizos



Terrizos con mezclas arcillosas

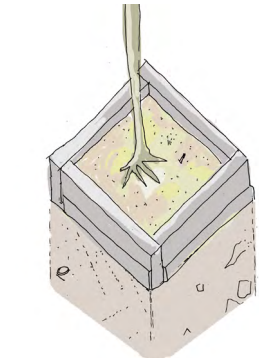


Terrizos arenosos

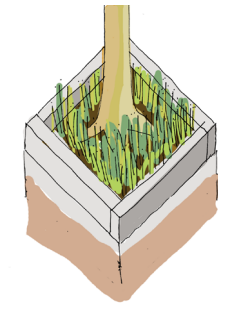


Arenas

alcorques



Alcorques sin vegetación



Alcorques con vegetación

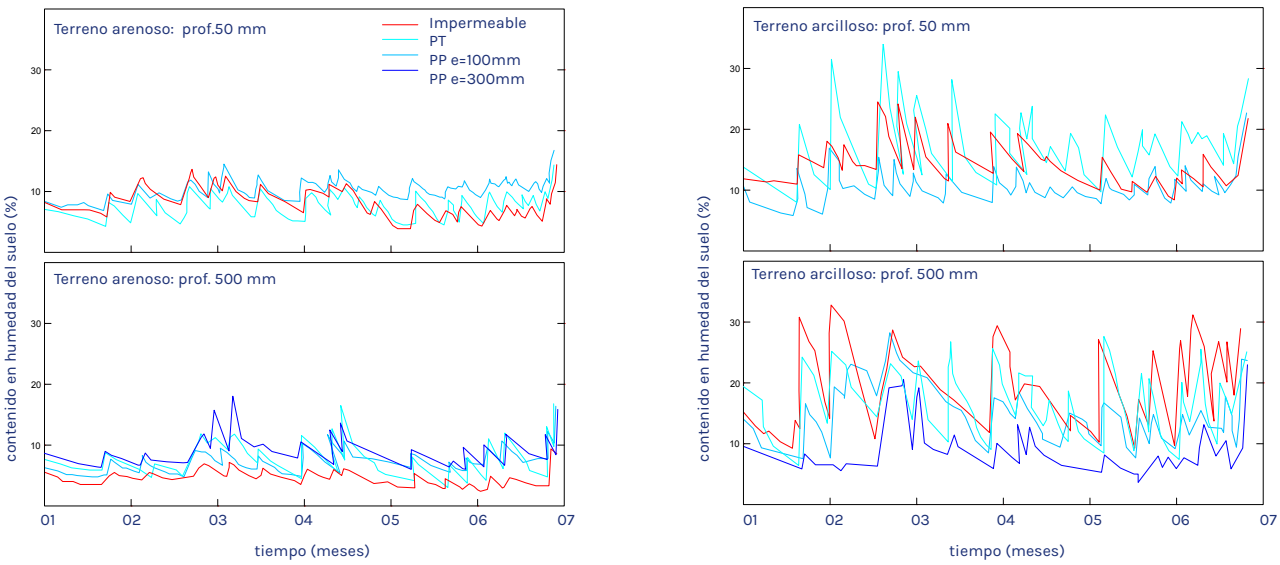


Figura E.07 Variaciones en el nivel de humedad del suelo según el tipo de superficie (gráfica elaborada segúun gráfica de Mullaney et al. 2005)

Se puede suponer que en Madrid, en las épocas mas húmedas, se produce una alta condensación bajo las superficies impermeables y permeables. Para ello, si se visualiza un plástico sobre una superficie de suelo desnudo, parece plausible imaginar que bajo el plástico la superficie se humedezca y se mantenga húmeda durante más tiempo que una superficie no cubierta, donde el agua se evapora.

Por otra parte, es necesario mencionar que en este estudio no se explica si este pavimento está drenado, ni si cumple todos los requisitos de un pavimento permeable (conductividad hidráulica adecuada del suelo). Si las primeras capas estan húmedas y retienen mucha humedad, entonces es probable que infiltre muy poco agua en el subsuelo.

Mullaney et al. (2015), ampliaron este estudio comparando el efecto de distintos tipos de pavimentos permeables e impermeables sobre suelos arcillosos y arenosos -esta vez, en un clima subtropical. Las conclusiones fueron que, en las capas superficiales, los PP aumentan las condiciones de humedad en suelos arenosos y la disminuyen en suelos arcillosos respecto de las superficies impermeables.

En este mismo estudio incluyeron también los pavimentos “sin base drenante” que en este trabajo se llaman pavimentos tradicionales. Sin embargo, no se especifica el tamaño y composición de las junta, por lo que no se pueden sacar conclusiones claras.

En los pavimentos sobre suelos arenosos se observó que la humedad aumentaba con la introducción de una base drenante, sin embargo en aquellos que tenían suelos arcillosos, la humedad era mayor si no había base drenante y menor si la había. En general, los suelos arcillosos tuvieron una mayor humedad media que el segundo.

En resumen, el problema de los pavimentos impermeables y los PP -en los climas estudiados- en lugares con bases arenosas es más bien la excesiva humedad y la ausencia de aire -por la compactación. Sin embargo, el uso de pavimentos tradicionales – o terrizos– en suelos arenosos puede disminuir ligeramente la humedad del suelo, y con ello aumentar la cantidad de aire, y por tanto, favorecer el crecimiento de los árboles.

Ante la sequedad ambiental de los meses de verano de Madrid es probable que los PT no sean tan beneficiosos para los árboles.

Crecimiento de árboles

Intervienen múltiples factores en el crecimiento y la supervivencia de los árboles: suelos compactados, calor extremo, falta de nutrientes, sequías, impactos con vehículos, vandalismo, etc. (Jack-Scott, 2012). En este documento se analizan los referentes a la gestión del suelo en la ciudad diseño del espacio urbano y suelo cercano al árbol.

Raíces

Uno de los problemas más relevantes de los árboles está relacionado con el

desarrollo de las raíces. Estas pueden estar o excesivamente expuestas o por el contrario excesivamente enterradas (Day et al. 2009). El exceso de suelo sobre las raíces parece estar relacionado con el fracaso en la implantación (Day et al. 2009). Hasta el momento existe cierta controversia sobre los niveles de profundidad de las raíces. Por una parte, deben estar suficientemente enterradas para poder captar agua, nutrientes, no estar expuestas a temperaturas altas y asegurar cierta estabilidad y por otra parte las raíces "profundas" pueden también afectar el desarrollo de los árboles. Day et al. (2009) resumen que los problemas pueden observarse a partir de 15 cm de profundidad.

Por ello, parece lógico pensar que sobre elevar alcorques en árboles ya existentes o generar bordillos de alcorques muy anchos y cercanos a la base limita el desarrollo radicular.

Diseño urbano

El contenedor y el suelo en que se plantan los árboles es determinante para su estado de salud y su porte. Por ello, el diseño urbano tiene una gran influencia en el crecimiento de los árboles.

Sanders y Grabosky (2014), en un estudio realizado sobre la influencia del tamaño de superficie sin pavimentar en 5 especies de árboles, confirmaron que en general, un mayor desarrollo del árbol se correspondía con una mayor superficie sin pavimentar. Teniendo en cuenta superficies de entre 6 m2 y 120m2.

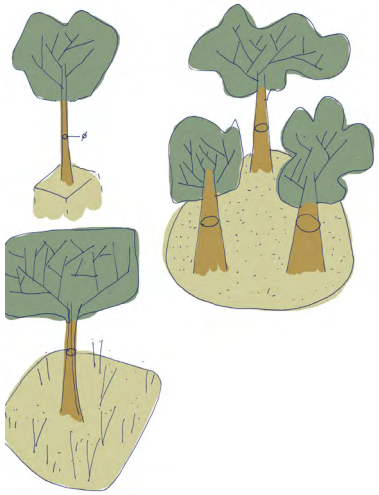


Figura E.08 Cuanto mas grande es el área en que estan plantados mas crecen.

Otro estudio (Sanders et al, 2013) estudia como en New Jersey, el DBH -*diameter at breast height* o Diámetro a la altura del pecho- de la mayoría de especies de árboles varía según si los árboles están plantados en alcorques, en zanjas vegetadas o en áreas de parque y aumenta con la superficie. Por ello definen el concepto de "suelo disponible aparente" y lo tratan como un indicador del crecimiento posible de los árboles.

En general, he encontrado pocos estudios relativos a alcorques con tamaños similares a los de Madrid -1m^2-, la mayoría tratan como tamaño mínimo 3m^2 (Sanders et al, 2013, Volder et al. 2009).

Pavimentos impermeables

Respecto de "suelos intactos" los pavimentos impermeables no siempre limitan el crecimiento de los arboles y no está claro que éste se deba a la presencia de pavimento (Volder et al. 2009; Morgenroth et Visser, 2011). Otras posibles causas son – el poco espacio de suelo, la compactación, la degradación física de la parte aérea, la contaminación del aire o del suelo y el nivel de humedad.

Pavimentos tradicionales

En los pavimentos tradicionales simplemente apoyados, el suelo se compacta siempre. En estos casos, las raíces tienden a crecer de forma superficial para tener algo de aireación y levantan el pavimento (Johnson T., 2009). Además, el suelo compactado impide el desarrollo de las raíces, al disminuir la cantidad de aire disponible y disminuir la capacidad de recibir nutrientes.

En el estudio de Mullaney et al. (2005), se observó que, en suelos arenosos, los pavimentos tradicionales podían mejorar el crecimiento de algunas especies de árboles. Morgenroth and Visser (2011) también observaron este fenómeno en suelos arenosos con una especie distinta -Platanus orientalis- y vieron como la introducción de una subbase podía afectar al crecimiento de los árboles. Esto se produjo bajo condiciones de compactación ligera – rodillo de 500kg-, en ambos casos.

Sin embargo, Volder et al. (2009) estudió tasas de crecimiento de árboles en sustratos arcillosos, rodeados por hormigón permeables, asfalto y hormigón y no se observaron diferencias en las tasas de

crecimiento de los distintos árboles, respecto de pavimentos impermeables.

Por esto se puede deducir qué entre los distintos pavimentos, estelos PT favorecen el crecimiento para algunas especies de árboles en suelos arenosos y sin una compactación excesiva de la base.

Pavimentos permeables

A pesar de que algunas publicaciones importantes (Ferguson, 2005) defiendan el uso de los pavimentos permeables como una técnica que favorece el crecimiento de los árboles, esto no es siempre el caso (Mullaney et al., 2009; Morgenroth, 2011; Watson, 2011).

La subbase granular puede ser beneficiosa en algunos casos y perjudicial en otros. Este fenómeno depende del tipo de suelo sobre el que se asiente, el nivel de compactación y la especie de árbol.

Mullaney et al. observó que los PP sobrey suelos arcillosos pueden aumentar el crecimiento de algunas especies. En particular su uso puede ser ventajosos en suelos poco drenantes y arcillosos.

Sin embargo, en suelos arenosos no mejoró -ni impidió- el crecimiento de los árboles respecto de suelos impermeables (Mullaney et al. 2009).

Morgenroth (2011) realizo un experimento con base granular y subbase sin compactar, y observó como esto mejoraba el crecimiento radicular. En general, se suele admitir que este es el factor que puede causar una diferencia: la no compactación de la subbase. (Drake et al. 2013).

En los pavimentos permeables en los que se mantiene la estructura del suelo original sin compactar, el equipo de Tim Johnson (Johnson T., 2009) defiende la posibilidad de que los árboles y los pavimentos permeables ejerzan procesos de facilitación.

En efecto, muestran cómo, cuando no se compacta el suelo, las raíces crecen más profundas y no afectan al pavimento ni lo desplazan. Además, se observan muchas raíces atravesando las capas superficiales de suelo y el geotextil. Es posible que esto, a su vez, favorezca la infiltración. Los investigadores aseguran que esta práctica establece *"future symbions"*.

Otras alternativas a la compactación

Frente a la compactación, se han desarrollado técnicas complementarias que permiten un mayor desarrollo del arbolado. Es importante distinguir y diferenciar entre dos tipos posibles del suelo: un suelo natural en buen estado o un suelo urbano `antropizado´. En el primero de los casos es claramente mejor proponer pavimentos flotantes y grandes áreas de suelo aparente, y en el segundo, los estudios apuntan más a el desarrollo de suelos estructurales o celdas estructurales.

Suelos no compactados

Definiciones
Zanjas vegetadas o alcorques contínuos.
Franjas continuas de vegetación entre alcorques situadas entre la acera y la calzada

"Super" alcorques
Alcorques de gran tamaño, superior a 6m² y con una profundidad de 1,5 m

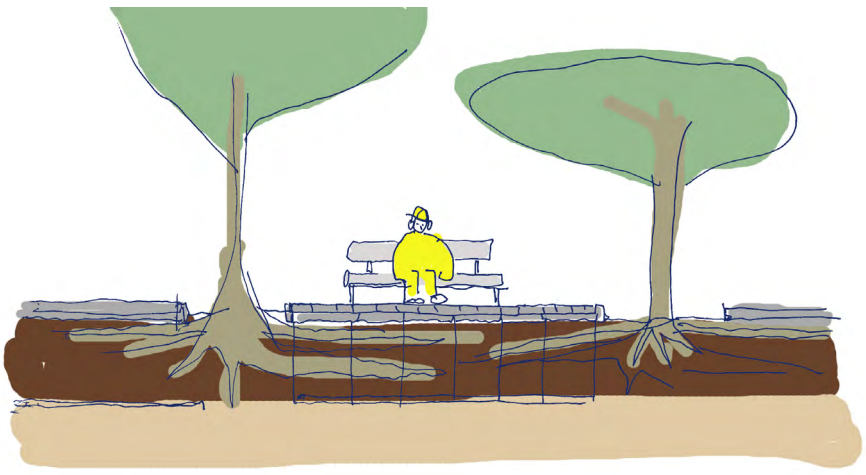


Figura E.09 Los pavimentos suspendidos, las celulas estructurales y los suelos estructurales permiten el desarrollo de raíces bajo pavimentos permeables e impermeables.

	DBH		Average Tree Growth		Area de canopea		Fuente
	min	max	min	max	min	max	
Alcorque -mínimo-	**1**		**1**		**1**		**Superficie de referencia**
Pavimentos permeables							
Adoquines con Juntas filtrantes	1		1	1,2; 1,4			Mullaney et a, 2005; Morgenroth, 2011; Volder et al.2009
Pavimentos tradicionales							
Adoquines con juntas grandes	0,9	1,2	0,9	1,1			Mullaney et a, 2005;Morgenroth, 2011
Según Tamaño de alcorque							
Zanja vegetada	1	1,4					
160m2 -Sin limite	1,3	1,88	0,5; 0,9			1,6	Sanders and Gabrowski, 2014; Sanders et al, 2013; Morgenroth, 2011;
Otros suelos							
Celulas estructurales	2,5	3					
Suelos estructurales	2,5	2,5					Ow et al., 2017

Volder et al. 2005: Los suelos sobre los que se hizo el experimento no estaban compactados, y no estaban en un entorno pavimentado, solo estaba pavimentada la base del arbol.

Morgenroth et al 2011; Suelos sin compactar

Sanders et al. 2013: Su alcorque mínimo de referencia es de 6m2, por lo que es posible que las tasas de crecimiento sean mucho mayores

Figura E.10 Tabla comparativa -respecto de un alcorque "común"- que permite evaluar la influencia relativa de los tipos de pavimentos y suelos en el crecimiento de los árboles

Celulas estructurales

Piezas de plástico que permiten soportar una carga ligera y que tienen en su interior hasta un 90% de topsoil sin compactar. Sobre ellas se deposita un geotextil y piezas de pavimento específicamente diseñadas o directamente una losa de hormigón. Permiten una correcta aireación y humedad del suelo para el desarrollo de las raíces de los árboles.

Pavimento suspendido

Sistemas de pavimento que integran una estructura que los separa del suelo y que no lo compactan. El pavimento queda suspendido y no apoya en el suelo.

La compactación y el espacio limitado de suelo son los grandes problemas de los suelos urbanos. Estas alternativas eliminan la compactación y permiten el rápido establecimiento y crecimiento de los árboles.

Suelos resistentes a la compactación

Suelos estructurales o suelos "esqueletales"

Suelos que por su granulometría permiten tener una gran compactación (con una densidad aparente mayor de 1,65 gr/cm3) y resistir pavimentos y cargas de tráfico ligero, al mismo tiempo que mantienen una cantidad adecuada de aire en su interior que permite la aireación de las raíces, y de limos y arcillas que favorecen el aporte en humedad y en nutrientes. Tienen gran abundancia de arenas, gravas o piedras que forman la "estructura" y en los espacios entre ellas albergan fracciones de arenas, arcillas y limos para el desarrollo radicular.

Se pueden dividir en dos tipos:

- Basados en arenas: El primer suelo estructural fue el Amsterdam Tree Soil (Watson,2011). Es un suelo arenoso con fracciones gruesas compactado con cuidado hasta una densidad específica.
- Basados en gravas o piedras: Tienen aproximadamente un 30% de vacíos. Es conveniente que se drenen correctamente en menos de 48 horas para no afectar a las raíces. Su granulometría suele ser de un 80% piedras o -preferiblementepuntiagudas- y un 20% de limos y arcillas con un 2 o 5 % de materia orgánica.

En general, existen gran cantidad de diseños registrados-patentes- de suelos estructurales y favorecen de forma distinta el establecimiento de vegetación.

En climas secos, estos suelos necesitan de riego porque tienen una gran porosidad (Day, 2008). Retienen 7-16% de humedad frente a un 25% suelo agrícola. Cuando se mezcla de forma adecuada y se compacta a una densidad alta no se reducen la cantidad de macroporos ni se limita la penetración de poros en el suelo. Pueden permitir una gran infiltración, un buen drenaje y una aireación

correcta. (Gabrosky et al.2009 según Watson,2011).

Pueden integrarse conjuntamente con pavimentos permeables o con PT, en ambos casos funcionarían como PP.

En distintos estudios consultados (Ow et Gosh, 2017) se observa que permiten un mayor crecimiento que los suelos compactados. El desarrollo radicular está limitado por el volumen de suelo neto mas que por el volumen total de mezcla.

En algunos casos – con tipos específicos de vegetación y con una granulometría específicas- los suelos estructurales favorecen crecimientos rápidos y de calidad, y en otros parecidos a suelos compactados.

Se pueden usar cuando no es posible disponer de suelos de buena calidad sin compactar. Los suelos estructurales pueden aumentar las tasas de infiltración de los subsuelos y pueden ser utilizados en sistemas de pavimentos permeables o pavimentos tradicionales. Aunque el subsuelo se compacte, el desarrollo radicular en el suelo estructural puede favorecer la infiltración a largo plazo.
Los árboles pueden ser más estables en suelos estructurales que en alcorques tradicionales porque el desarrollo radicular es mayor.

El espesor de los suelos estructurales es importante. No se recomiendan espesores de 10 cm (Gabroski and Bassuk, 1996), sino más bien de 60 cm de profundidad. Cuando se utilizan espesores pequeños, se puede favorecer el crecimiento de raíces en esas capas y con ello la degradación rápida del pavimento por raíces.

El pH de estos suelos es básico por la presencia de sustratos tecnológicos -entre 7.5 y 8.5-. Esto favorece la precipitación e inmovilización de metales pesados y dificulta el desarrollo de vegetación -al disminuir de la disponibilidad de nutrientes-.
En algunos estudios se concluyó que el crecimiento de árboles en suelos estructurales era similar al de entornos vegetados -áreas de césped- (Gabroski and Bassuk, 2008), y en otros que el crecimiento de los árboles era muy superior en entornos con suelos sin compactar: pavimentos suspendidos o células estructurales (Ow et Ghosh, 2017; Bühler,200-; Smiley, 2008) .

En resumen, un diseño urbano que integre los distintos conceptos revisados puede permitir una mejor adaptación al cambio climático. La vegetación se puede introducir de muchas formas y aportar grandes beneficios ecosistémicos. Para ello es necesario tener en cuenta tanto las técnicas constructivas, el clima local, el suelo y el espacio público.

Figura E.11 Proyecto "Belles du Bitume" (Proyecto de Frédérique Soulard, Foto de Raphaël Guionet)

Proyectos innovadores

En el evento Progress 4 - dentro del marco Erasmus+ Strategic Partnership- (www.progress-project.eu), sobre gestión sostenible de parques, se han dado a conocer distintas iniciativas y estudios relacionados con la gestión del pavimento y de los alcorques. Entre ellos destacan:

Adopción de Alcorques
Programa puestos en marcha por el ayuntamiento de Antwerp (Amberes) para que los ciudadanos "adopten" temporalmente uno o varios alcorques para plantar vegetación en su base.
-El ciudadano se identifica y se responsabiliza de un alcorque señalizandolo con una etiqueta especifica durante el tiempo que el elija.
-La ciudad dispone de una serie de directrices para no causar perjuicios al arbolado y propuestas de vegetación según la exposición al sol.

Adoquines y suelo estructural: Ocupación flexible del espacio urbano
Programa para permitir la plantación de enredaderas en las fachadas.
-Implantación de una franja de suelo estructural colindante a la fachada cubierta por adoquines con junta seca, para poder extraerlos cuando se decide plantar la enredadera.
-Permiten plantar sin pedir autorización al ayuntamiento.
-Posibilidad de tender un cable entre dos fachadas enfrentadas pidiendo permiso al ayuntamiento, cumpliendo normativas para la accesibilidad de camiones de bomberos.

Investigación sobre el efecto de `malas´ hierbas en el pavimento
En la Universidad de Copenhague se está estudiando el efecto de la aparición de `malas´ hierbas en la duración del pavimento. Para mantener un firme liso estándar, se estima que las `malas hierbas´ disminuyen 10 años la vida útil del pavimento en Dinamarca. Puede ser que en climas secos, la fuerte evapotranspiración del verano tengan un efecto menor. Por otra parte, consideran que si se flexibilizan las exigencias sobre la rugosidad del firme en algunas zonas es posible mantener ciertas zonas pavimentadas con vegetación espontánea.

Problemas frecuentes

Mantenimiento y ejecución

Uno de los elementos mas determinantes de la salud del "bosque urbano" es método en que se plantan y el cuidado con el que se realiza. Durante la redacción de este trabajo se han observado malas prácticas de ejecución de obras de pavimentado en relación con el arbolado.

Es muy común observar que los materiales de obra se apoyan sobre en las raíces de los árboles, al ser estos espacios residuales (Figura E.12).

También es frecuente ver que, para simplificar la ejecución, se vierte algo de hormigón en los alcorques -bastante pequeños de por sí. Esto tiene consecuencias directas en la salud del árbol(Figura E.13).

En cierta medida, esto es un paso anterior imprescindible a plantearse que tipo de pavimento es más o menos eficiente para la gestión del arbolado viario.

Figura E.12-13 Malas prácticas durante la ejecución.

Notas adicionales

En el siguiente apartado se realiza una revisión de algunos temas que pueden ser útiles para tener una visión global del diseño urbano aunque este documento se centre de forma específica en ellos.

Una primera parte analiza algunos servicios ecosistémicos que no han sido analizados a fondo en este documento pero que se consideran relevantes -o al menos curiosos- para una planificacion "completa" del espacio urbanizado: la capacidad para influir en el olor -en particular el olor a lluvia y a tierra mojada- y su capacidad para influir en la contaminación acústica.

En una segunda parte -dedicada a temas imprescindibles para el diseño urbano- se estudian las interacciones de éstos con los acabados estudiados en este documento.

Primero, se revisa el impacto de los distintos tipos de pavimentos en la conservación del patrimonio. También, se analiza la normativa de accesibilidad y se deduce de ella qué tipos de pavimentos pueden ser considerados accesibles. Después, se indican ciertos puntos clave sobre la minimización del consumo de recursos en el diseño urbano. Finalmente, se presenta un apartado sobre los costes de ejecución y mantenimiento de los distintos tipos de pavimento estudiado.

Influencia en el olor

En general, el olor no es un tema estudiado en el diseño urbano, sino es en casos extremos de falta de salubridad. ¿Pueden tener los pavimentos influencia en ellos? En un primer momento se estudia el olor a lluvia, -que se produce antes o al comienzo de una lluvia después de periódos de sequía- y , después, el olor a tierra mojada, -que se produce después de una lluvia. Después, se revisa la documentacion asociada respecto a la difusión de olores.

Olor a lluvia

Existen diversas investigaciones sobre el olor a lluvia. Las primeras lo denominaban “olor arcilloso” pero las investigaciones de Bear et al. (1964) pusieron en evidencia que este olor a lluvia, al que denominaron *petricor*, se produce no sólo en las arcillas si no en el conjunto de silicatos. Se da esencialmente en regiones de climas áridos, al exponer estas superficies a la humedad o a la lluvia, después de varios días o meses de sequía. La porosidad o el grado de *caolinización* del material no influyen en el proceso. La intensidad del olor depende de la superficie expuesta y del tiempo de exposición.

En un segundo artículo, Bear et al. (1965) estudiaron la génesis del aceite responsable del *petricor*. Identificaron cuatro fases esenciales:

1| La introducción en la atmósfera de compuestos orgánicos volátiles de animales y vegetales.
2| La degradación, la oxidación parcial y la nitración de estos compuestos en la atmósfera
3| La adsorción selectiva, la fijación y la transformación de compuestos específicos por la superficie del silicato
4| El retorno a la atmósfera de los compuestos volátiles y olorosos.

Respecto de los pavimentos, se puede suponer que este proceso se puede producir en muchas superficies urbanas, pues existen silicatos en gran parte de los materiales de construcción. Sin embargo, al existir poca vegetación y numerosos contaminantes orgánicos e inorgánicos, es probable que se encuentren en menor proporción en el aire, por lo que su intensidad sea menor.

Olor a tierra mojada

El olor a tierra mojada es el aroma de la geosmina, -un compuesto orgánico producido por bacterias o hongos que se encuentran en el suelo- es perceptible cuando la tierra se humedece (Scientific American, 2012).

Para que se produzca el olor a tierra mojada es por tanto necesario que haya “tierra”, (aunque esto sea aparentemente obvio. Respecto de los acabados, los pavimentos tradicionales, los terrizos y los alcorques son capaces de emitir este olor.

Difusión del olor

La introducción en la atmósfera de compuestos volátiles ha sido ampliada y desarrollada en un estudio del MIT sobre la formación de aerosoles -pequeñas gotas de agua o partículas sólidas suspendidas en gas (Young, Buie, 2014). Los aerosoles se forman principalmente en medios porosos.

Las burbujas de aire se generan en la interfaz entre la gota de agua y la superficie del suelo, mediante la introducción del aire que está en los poros superficiales. En este proceso es muy relevante la rugosidad – que debe mantenerse entre 1 y 20 µm y la difusividad hidráulica de la superficie – que debe ser menor de 50 mm^2 /s. Se percibe principalmente en suelos arcillosos, arcillas arenosas y limos arcillosos. La velocidad de la lluvia es muy relevante en estos procesos: los aerosoles se producen sobre todo con lluvias suaves y muy suaves.

Este artículo contradice, en cierta medida, los artículos sobre el petricor, por lo que parece que todavía se desconoce cómo se difunde el olor en medios muy poco porosos- como las rocas o superficies lisas. En este sentido, parece probable que la presencia de superficies con arcillas favorezca la difusión de olores respecto de otras superficies impermeables. En el caso de sustancias orgánicas con mal olor o incluso patógenas, las superficies con "suelo" favorecerían tanto la descomposición de estas como su difusión en forma de aerosol, por lo que sería necesario evaluar en qué medida su uso puede ser beneficioso o perjudicial para la ciudad.

Protección del patrimonio

En su artículo Aislarse o Integrarse, Miguel Sobrino (2007) habla sobre la relación -ecosistémica- de los edificios tradicionales con los pavimentos que los rodean. En él, enuncia una hipótesis sobre la forma en que se favorece la aparición de humedades en edificios tradicionales cuando se impermeabiliza el pavimento circundante. Esta hipótesis surge de la observación de cómo al impermeabilizar superficies de pavimentos tradicionales colindantes a edificios tradicionales, surgen humedades en los muros perimetrales de los edificios. Asume que los pavimentos tradicionales permiten el ascenso de agua por capilaridad, y "secan" parcialmente el suelo, mientras que los impermeables evitan ese ascenso -que se produce en la zona mas porosa: los muros tradicionales.

Según los procesos estudiados en los diferentes artículos a lo largo de este documento (en ciclo del agua y desarrollo de vegetación), esta hipótesis puede ser completada comprendiendo el impacto en la humedad de los pavimentos impermeabilizantes. Los pavimentos impermeables y los PP aumentan mucho la humedad de los niveles superficiales de suelo favoreciendo procesos de condensación. Sin embargo, la humedad del suelo en los PT es mucho menor -ya que infiltran poca agua en el suelo y mantienen un equilibrio con la humedad con la atmósfera. Este proceso varía mucho según el tipo de suelo, por lo que sería importante determinar en que condiciones sucede y en cuáles no. A pesar de que sería necesario comprobar esta hipótesis mediante ensayos adaptados a los climas locales, esto puede tener grandes consecuencias en la protección del patrimonio.

Contaminación acústica

Sin realizar un análisis exhaustivo sobre el impacto en la contaminación acústica de las ciudades, es importante resaltar o distinguir dos elementos referentes al ruido y los pavimentos. Primero, el ruido que produce el mantenimiento o desmontaje ocasional del suelo y, segundo, el ruido producido por vehículos o dispositivos al transitar sobre distintas superficies.

En el siguiente cuadro se puede observar una hipótesis de cuantificación del ruido producido por distintos tipos de pavimentos. Como comenta Lopera (1986), los ruidos producidos por los adoquines, y la irregularidad puede ser utilizado como medida disuasoria para el uso del espacio urbano.

	Mantenimiento	Tránsito de vehículos
Superficie impermeable	XXXXX	X
Pavimentos permeables		
Adoquines con Juntas filtrantes		XX
Asfalto y hormigones porosos	XXXXX	X
Pavimentos tradicionales		
Adoquines o piezas de menos de 8 cm	X	XXX
Adoquín madrileño	XX	XXXX
Losas o piezas grandes	XX	XX
Terrizos		
Terrizos con mezclas arcillosas (max)	XX	X
Terrizos con mezclas arenosas (min)	XX	X

Figura F.01 Tabla estimativa sobre la influencia de los distintos tipos de pavimentos estudiados en la contaminación acústica

Accesibilidad

Introducción a la normativa de accesibilidad

En España, la accesibilidad y el diseño del espacio público en general se define mediante la normativa de ámbito estatal, ¨Orden VIV 561/2010, de febrero, por la que se desarrolla el documento técnico de condiciones básicas de accesibilidad y no discriminación para el acceso y utilización de los espacios públicos urbanizados´.
En el Ayuntamiento de Madrid, esta normativa se traduce en el Manual de Accesibilidad para espacios públicos urbanizados del Ayuntamiento de Madrid. (MAEP-AM).

En lo que se refiere a la estructura urbana propone la creación de itinerarios peatonales accesibles. Dividen las calles en bandas que clasifican en tres grupos: (1) itinerarios peatonales accesibles, (2) mobiliario urbano, instalaciones de servicio, arbolado y jardinería, zonas estanciales (3) circulación, estacionamiento de vehículos, carga y descarga de mercancías. Destacan que es conveniente que el itinerario peatonal accesible discurra colindante o adyacente a la línea de fachada.

En el caso de calles estrechas se defiende la realización de una plataforma única, que permite la circulación peatonal prioritaria en las mismas.

En lo que respecta a las superficies estudiadas enuncian lo siguente:

Pavimentos

¨Artículo 11. Pavimentos. 1. El pavimento del itinerario peatonal accesible será duro, estable, antideslizante en seco y en mojado, sin piezas ni elementos sueltos, con independencia del sistema constructivo que, en todo caso, impedirá el movimiento de las mismas. Su colocación y mantenimiento asegurará su continuidad y la inexistencia de resaltes. 2. Se utilizarán franjas de pavimento táctil indicador de dirección y de advertencia siguiendo los parámetros establecidos en el artículo 45.´ (Orden VIV 561/2010). En este sentido en los itinerarios peatonales accesibles es obligatorio tener sistemas impermeables.

Alcorques

Los alcorques en vía pública pueden presentarse en dos formas:
¨- Enrasados con el pavimento. En este caso el alcorque es pisable siempre que su remate o cubrición superficial sea estable y no presente irregularidades, pudiendo formar parte del itinerario peatonal accesible. [...]
- Sobre elevado con respecto a la rasante del itinerario peatonal, con un elemento que permita detectarlo de al menos 10 cm de altura y con contraste cromático con el pavimento circundante a fin de evitar posibles tropiezos´ (MAEP-AM).

Terrizos

En el caso de itinerarios peatonales accesibles sin pavimentar, se deberá asegurar la estabilidad del firme en seco y húmedo, previendo el tránsito de sillas de ruedas, carritos de bebé o elementos similares que precisen rodar por su superficie.

Si se emplean tierras compactadas se evitará el material disgregado y se preverá el drenaje de aguas superficiales, evitando que el agua de escorrentía pueda generar baches y encharcamientos (MAEP-AM).

Superficies estudiadas según la normativa de accesibilidad

Según lo dicho en la normativa de accesibilidad se establece la tabla de la página siguiente.

Permite evaluar en qué "banda" es posible introducir en los pavimentos estudiados en este documento.

	(1)	(2)		(3)	
Superficies estudiadas	**Itinerarios peatonales accesibles**	**Mobiliario urbano, instalaciones de servicio, arbolado y jardinería, zonas estanciales**		**circulación, estacionamiento de vehículos, carga y descarga de mercancías**	
		Mobiliario, áreas estanciales, instalaciones	Arbolado y jardinería	Estacionamiento de vehículos ligeros	Carga y descarga y circulación, y estacionamiento de tráfico pesado
Pavimentos permeables	Sólo si son contínuos -asfaltos, hormigones, resinas-	Sí	X	Sí	Sólo en áreas de tráfico muy ligero y lento
Pavimentos tradicionales	No	parcialmente	X	Adoquines madrileños sí, Resto no	Adoquines madrileños sí, Resto no
Alcorques	Con rejilla o con tierra compactada	X	Con un elemento de borde de al menos 10 cm de altura, preferiblemente de 25 cm	X	X
Terrizos	En parques, compactados a un 90% del Proctor y con drenaje lateral	¿?	X	X	X

Figura F.02 Tabla resumen sobre la zonificación de pavimentos en la clasificación establecida por la normativa de accesibilidad.

Reflexiones sobre la normativa de accesibilidad

Consideraciones sobre diseño urbano

Resulta un acierto la organización en bandas en el espacio público de las vías y la creación de itinerarios accesibles con un tamaño mínimo.

Sin embargo, es necesario destacar ciertos elementos importantes que difieren de otras normativas o manuales de diseño de espacio público, citadas en el MAEP-AM, como el documento de Boston Complete Streets (BCS, 2013).

Este documento no define el itinerario peatonal accesible como un espacio ligado a la línea de fachada, sino que se define un espacio `front zone´ entre la fachada y el itinerario accesible, que varía según el tipo de calle y el uso en planta baja. También el ancho de este itinerario está ligado a la intensidad y al tamaño de la calle. Esto está directamente relacionado con las observaciones de Jahn Gehl (2010) sobre el uso del espacio público y la creación `espontánea´ de espacios de estancia y de observación en el límite entre el espacio privado y el público. Tener en cuenta este "espacio urbano" y darle un tamaño en el diseño según los usos en planta baja puede ser un acierto y construir un espacio público de mayor calidad.

Otra cuestión importante a destacar es la homogenización del ancho mínimo de accesibilidad. Si bien 1,80 metros es un tamaño más que adecuado para una calle de uso medio o bajo, es absolutamente inadecuado para una calle con un uso peatonal intenso y con una planta baja comercial. Es cierto que es una normativa de `mínimos´, pero, de la misma forma que la vivienda mínima ha instaurado unos tamaños generales en la vivienda, esta normativa corre el riesgo de fijar unos espacios genéricos, y mantener el resto para usos estanciales -lucrativos, como las terrazas-.

Consideraciones sobre sostenibilidad

Esta sistematización deja de lado algunas soluciones que podrían ser eventualmente útiles y garantizarían la accesibilidad, al mismo tiempo que limita ampliamente los servicios ecosistémicos de los existentes. En la siguiente tabla se pueden contemplar algunas anotaciones sobre la normativa.

Superficies estudiadas	(1) Itinerarios peatonales accesibles	(2) Mobiliario urbano, instalaciones de servicio, arbolado y jardinería, zonas estanciales	(3) circulación, estacionamiento de vehículos, carga y descarga de mercancías
Pavimentos permeables	Los PP de juntas filtrantes, a pesar de estar realizados con piezas, son perfectamente accesibles (si el material del adoquín cumple los requisitos).		
Pavimentos tradicionales	Los enlosados tradicionales y las piezas ciclópeas correctamente mantenidas, son una opción accesible. (Ej: Berlín)		
Alcorques	Las rejillas "no apoyadas" pueden proteger adecuadamente la compactación del suelo. El suelo compactado limita el desarrollo radicular.	El alcorque sobreelevado favorece mucho el fenómeno de "deep-root" y limita el crecimiento del árbol. También evita la recogida de agua de escorrentía si es continuo.La vegetación podría ser una técnica de reconocimiento textural del alcorque.	
Terrizos	No existe una posición clara del uso del terrizo en bulevares y paseos incluidos en itinerarios accesibles		

Figura F.03 Tabla resumen sobre la zonificación de pavimentos en la clasificación establecida por la normativa de accesibilidad.

Conclusiones

Parece necesario plantearse si, antes que transformar el conjunto de las calles de la ciudad para que respeten la normativa de accesibilidad no es posible realizar una solución que integre diferentes puntos de vista e integre la biodiversidad y la sostenibilidad -siguiendo el principio de las calles completas (BCS, 2013). El documento de las calles completas de Boston es un ejemplo de gran profundidad y calidad, que propone soluciones que varían en función del uso, del tamaño de acera y permite realizar actuaciones que maximizan los beneficios ecosistémicos al mismo tiempo que garantizan la accesibilidad y la calidad del espacio urbano. El sistema de lectura y organización de la calle y el pavimento puede además servir como un sistema de organización y optimización de los recursos hídricos.

Finalmente, es importante destacar la importancia del mantenimiento adecuado para la accesibilidad. Sería óptimo que este mantenimiento sea integrado, para una mayor eficiencia, en un contexto global e unificado de mantenimiento del espacio público. Apostar por un cuidado de calidad puede asegurar una accesibilidad “real” al mismo tiempo que permitir la introducción de técnicas mas sostenibles.

Precisamente, en la actualidad, la presencia de pavimentos continuos sobre losa de hormigón no evita la falta de accesibilidad por falta de mantenimiento. Las medidas propuestas en el Manual (MAEP-AM), pueden funcionar sólo con un cuidado y revisión adecuadas.

También la introducción de suelo compactado en los alcorques que invaden los itinerarios peatonales puede, en caso de un mantenimiento bajo, provocar escorrentía con arenas y arcillas en las áreas peatonales y generar áreas resbaladizas, o la introducción de rejillas puede traducirse en ligeras irregularidades no muy perceptibles a la vista y por ello muy peligrosas para el peatón.

En este sentido, un acercamiento conjunto a la gestión del espacio público puede ser garante de la accesibilidad y la sostenibilidad.

Minimización del consumo de recursos

En su artículo, `Criterios para reducir el impacto ambiental asociado a la Urbanización´ de José Molina Terrén (2000), propone una serie de directrices muy acertadas para reducir el impacto ambiental en las obras de urbanización y se centra en el diseño del espacio urbano haciendo un pequeño análisis sobre pavimentos. Se recomienda la lectura completa de ese artículo para ampliar este apartado.

En particular, destaca una serie de directrices de diseño, dimensionado, materiales y técnicas. Introduce 9 criterios sobre los que basa su artículo.

Estos nueve criterios son:
-dimensionado estricto de calles
-dimensionado estricto de firme, teniendo el cuenta las características geotécnicas del suelo
-integración de alcorques en bandas de aparcamiento
-integración de tendidos y elementos urbanos en edificación
-compensación y reutilización de tierras
-reducción del abuso de productos cementosos
-reducción del abuso de productos bituminosos
-utilización de áridos marginales
-recuperación de técnicas tradicionales (Terrén, 2000)

Estos principios permiten minimizar la cantidad de materiales que conlleva un gasto energético, maximizar el uso de productos reciclados y por tanto minimizar impacto ambiental.

Es particularmente relevante la opinión que emite sobre los alcorques: `Supone una desproporción de bordillo por superficie de alcorque (aproximadamente 5 m/m2, algo menos en caso de coincidir uno de los lados con el límite de calzada) y obliga a un incómodo zizagueo de las canalizaciones subterráneas de los servicios urbanos, sobre todo el alumbrado público y red de riego, que son los más cercanos a la calzada.´ (Terrén, 2000). Esta situación se agrava con la implantación de la nueva normativa de accesibilidad que exige que los bordes sean 10 cm más altos que el nivel del pavimento. El autor propone integrar los alcorques en las franjas de aparcamiento. Esto puede ser una buena medida, de la misma forma que lo sería hacer aceras mas anchas y proponer zanjas vegetadas o, al menos, repensar el diseño del bordillo de los alcorques.

Respecto de los pavimentos propone optar por la introducción de firmes flexibles o articulados y sustituir las piezas prefabricadas por sus equivalentes en piedra natural de canteras próximas al ámbito de actuación (o recuperadas de obras antiguas, como es el caso del adoquín de Madrid).

Por supuesto, destaca la importancia de proponer sistemas constructivos de junta seca -de piezas- frente a pavimentos de junta húmeda –que, en este documento, se han denominado pavimentos impermeables. Esto facilita el mantenimiento. También destaca la calidad de losas o adoquines. Propone la incorporación de adoquines en las zonas de estacionamiento, en las calzadas de coexistencia y en los senderos peatonales. Realiza un cálculo simplificado para estimar la energía incorporada en cada material, que muestra la importancia de tender hacia sistemas más flexibles y de piezas.

Pavimento rígido	Pavimento flexible	Adoquín de hormigón	Adoquín de granito
166 kWh/m²	94 kWh/m²	45 kWh/m²	24 kWh/m²

Figura F.04 Tabla de energía incorporada aproximada incorporada en cada tipo de pavimento (Terrén, 2000).

También recalca las técnicas tradicionales -basadas en muy poco material y mucha mano de obra, como sostenibles. Dentro de esto destaca los avenamientos del terreno, los solados de piedra, la mampostería ciclópea (grandes piezas de piedra) y los caces de piedra para dirigir el agua.

Esta información permite una lectura de los pavimentos estudiados a través de la energía que consumen para su producción. En este caso, los PT son más sostenibles pues necesitan una menor mano de obra y menos material y los PP -al necesitar de una gran cantidad de material- pueden ser más o menos sostenibles según su capacidad para incorporar materiales reciclados, según si se constituyen de materiales continuos o piezas y según el origen de los materiales.

Precios (aproximación)

En la siguiente tabla se puede ver una lista de los distintos precios aproximados de las superficies estudiadas. Sin embargo, es importante comprender que, según lo estudiado, los distintos pavimentos proveen de servicios ecosistémicos distintos, algunos de ellos son cuantificables económicamente -mejora del rendimiento de la red de saneamiento, disminución de las temperaturas- y otros no, al menos de una forma sencilla, -valor cultural, biodiversidad, calidad urbana, etc.-.

En este sentido, la mayoría de pavimentos estudiados, aún siendo más caros -en términos de construcción y mantenimiento-, pueden mejorar el espacio urbano y mejorar la vida de los ciudadanos, suponiendo una mejora para el medio ambiente urbano y para los ecosistemas cercanos.

En este caso es necesario insistir en que un cambio del sistema de gestión y mantenimiento del espacio público podría modificar de forma relevante los precios.

Como elementos destacables es importante destacar el elevado precio de las resinas poliméricas drenantes, en particular las que cubren los alcorques. Si estas se ejecutan compactando primero el suelo, o si se apoyan motos en ella (como es el caso en Madrid), resulta sorprendente la baja eficacia "ecológica" respecto del precio.

También es importante el precio de los adoquines de gran tamaño de granito. Esto pone de relevancia el valor de los adoquines que están enterrados bajo las superficies asfaltadas de Madrid.

	Material e instalación (€/m2)	
Superficie impermeable -firme rígido-	40-50 €	
Superficie impermeables -firme flexible-	20-40 €	
Pavimentos permeables		
Adoquines con Juntas filtrantes	50-80€	(según material de piezas)
Asfalto y hormigones porosos	40-50 €	
Otros materiales porosos con aglutinantes	80-100€	
Con vegetación (+50%)		
Con grava (+50%)		
Pavimentos tradicionales		
Adoquines o piezas de menos de 8 cm	55-75 €	
Adoquin madrileño	80-90€	(Mucho mas barato si se reutilizan los adoquines existentes).
Cantos de morro	80-100€	
Terrizos		
Arenas graduadas a arenas gruesas	10-20 €	
Acabados de alcorque		
Resina	120-160 €	
Tapa metálica	100-200 €	

Figura F.05 Tabla resumen de precios aproximados de ejecución de los distintos tipos de superficies estudiadas. (Fuente: Generador de precios, http://www.generadordeprecios.info/ y diferentes estudios de arquitectura que han llevado a cabo obras con estas superficies)

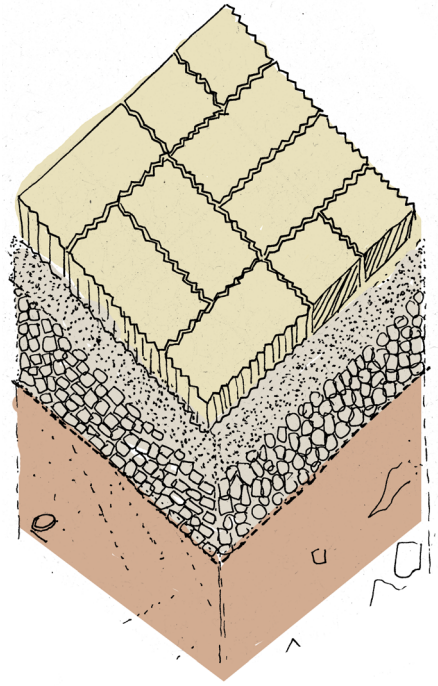
Características por tipo de pavimentos

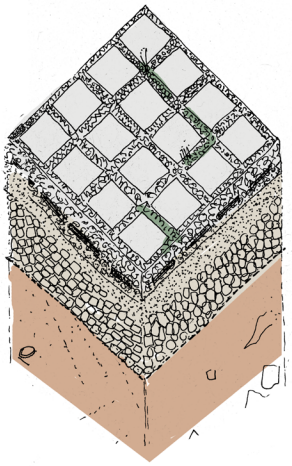
Para poder consultar algunas características principales de los distintos tipos de pavimentos se realiza un resumen por tipo, que permite revisar para qué puede servir -desde un punto de vista ambiental- cada pavimento en el diseño urbano.

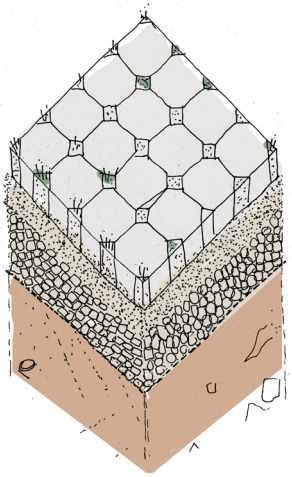
Sin embargo, se recomienda leer el conjunto del documento y sólo revisar -si es necesario- este resumen. Este documento no configura un catálogo, sino que a través de una serie de ejemplos estudia qué características del diseño pueden influir en el medio ambiente urbano.

No se trata tanto de un "manual" como de una revisión del funcionamiento básico de algunos tipos -escogidos- de pavimentos que no sellan completamente el suelo.

Pavimentos permeables
de adoquines con juntas filtrantes







Construcción

01 Pavimento de juntas filtrantes
02 Juntas filtrantes -gravas de 2 a 5 mm-
03 Base arenosa -gravas de 2 a 5 mm- e= 30 mm
04 Subbase granular 20-63 mm (espesor según cantidad de agua que se desee infiltrar y precipitaciones)
05 Geotextil para evitar la entrada de finos desde el suelo compactado
06 Suelo compactado* (*en general)

Objetivos de diseño

•Limitar la escorrentía de episodios torrenciales
•Mejorar la eficiencia de la red de drenaje existente
•Infiltrar agua en el subsuelo, detener o captar agua de lluvia

Los PP son los únicos que permiten al mismo tiempo cierta sostenibilidad y un tráfico ligero o medio sobre ellos.

Condicionantes

•Pendientes menores a 5%
•Nivel freático a más de un 1 metro de profundidad
•Suelo no contaminado
•Suelo infiltración alta (arenoso Ks> 10^{-6}) para infiltrar
•Necesidad de cálculo de capacidad según intensidad de lluvias y volumen de agua a retener

Otras posibilidades

A nivel de impacto ambiental, estos pavimentos funcionan de forma similar a todos aquellos que tienen juntas con gravas de 2 a 5 mm.

Pueden tener "juntas grandes" -*enlarged joints*- o "agujeros" filtrantes.

Son alternativas a otros sistemas de infiltración de agua en el suelo: zanjas vegetadas, etc.

¿Dónde se puede poner?

•Aparcamientos grandes -centros comerciales, zonas industriales no contaminantes, áreas residenciales.
•Plazas grandes.
•Zonas peatonales donde la infiltración (si se desea infiltrar) no sea un problema para el suelo
•Vías de tráfico ligero o medio.

- Eficiencia +

Reducción de la Escorrentía

Especialmente diseñados para reducir la escorrentía y aumentar la infiltración.

Evapotranspiración y Temperatura

•Temperaturas más bajas que un pavimento equivalente sobre base de hormigón de noche y un día después de lluvias.
•Más altas en periodos de sequía durante el día.
•Puede variar según el material de las juntas o del adoquín (materiales con poros que retienen el agua contra la gravedad: ladrillo machado)

Retención de la Contaminación

•Degradación total de contaminantes orgánicos si hay algo de nitrógeno disponible.
•Inmovilización de metales pesados 50-60%.
•Ninguna retención de cloruros (sal) -incompatible con la sal de nieve.
•Por lo general, se puede considerar que protegen los acuíferos.
•Es preferible realizar un seguimiento

Soporte para la vegetación

•Baja
•Depende de los materiales de las juntas o de los adoquines.

Beneficio para el desarrollo de árboles

Sólo mejora si:
•suelos "buenos" no compactados
•base y/o subbase granular realizada con suelos estructurales pero necesidad extra de agua en climas secos
•en algunos tipos de árboles en suelos arcillosos*
*probado para climas húmedos
•puede generar anaerósis en el suelo

Problemas principales

•Fenómeno de atasco o *clogging*: disminución de la infiltración a menos de los límites permitidos. No es muy problemático en los pavimentos de adoquines.
•Baja infiltración de los suelos sobre los que se asienta
•Aumento de temperaturas en periodos de sequía

Soluciones posibles

•Al *clogging*: protección ante contaminantes puntuales (cubrir si hay obras en edicios cercanos), barrido frecuente, aspiradora de vacío (no muy efectiva), rehacer las juntas periódicamente
•A la infiltración limitada del suelo: realizar zanjas o perforaciones para aumentar la infiltración.
•A la temperatura elevada: baldeo de calles o mezcla de sistemas de captación con sistemas de infiltración.

Patrimonio

Peligro si se instala cercano a cimentaciones de edificios, por creación de redes hídricas subterráneas (separación entre 2 y 6 m).

Contaminación acústica

Baja en la construcción y en la circulación.

Accesibilidad

Alta, pero no admitidos por ley en itinerarios peatonales accesibles.

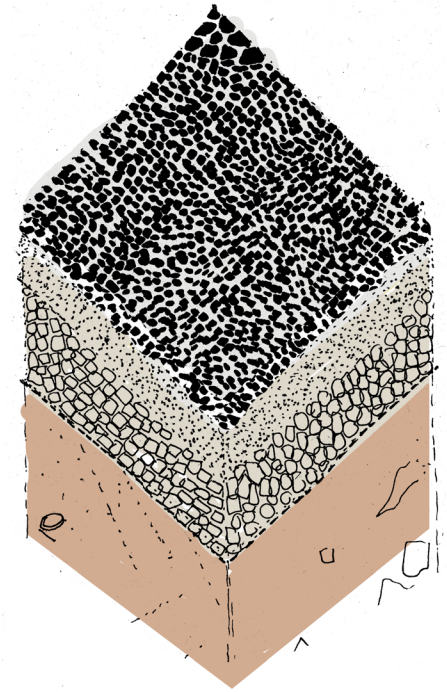
Recursos no renovables necesarios

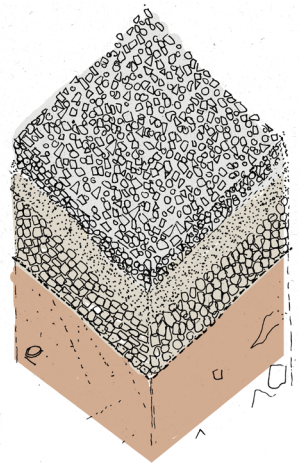
Adoquines de hormigón, reutilizables. Gran cantidad de gravas; menor impacto si provienen de residuos de demolición inertes.

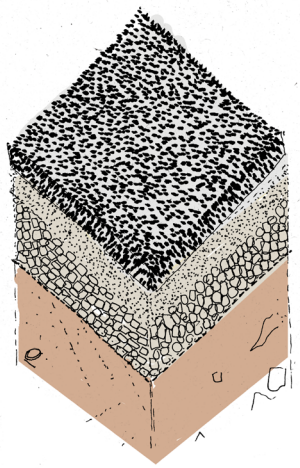
Precio

50-80 E
Varía según método de gestión del espacio público.

Pavimentos permeables de asfalto y hormigón poroso







Construcción

Pavimentos permeables porosos

01 Pavimento de material poroso
02 Base arenosa -gravas de 2 a 5 mm- e= 5 cm
03 Subbase granular 20-63 mm (espesor según cantidad de agua que se desee infiltrar y precipitaciones)
04 Geotextil para evitar la entrada de finos desde el suelo compactado
05 Suelo compactado* (*en general)

Objetivos de diseño

•Limitar la escorrentía de episodios torrenciales
•Mejorar la eficiencia de la red de drenaje existente
•Infiltrar agua en el subsuelo, detener o captar agua de lluvia

Los PP son los únicos que permiten al mismo tiempo cierta sostenibilidad y un tráfico ligero o medio sobre ellos.

Condicionantes

-Pendientes menores a 5%
-Nivel freático a más de un 1 metro de profundidad
-Suelo no contaminado
-Suelo infiltración alta (arenoso Ks> 10^{-6}) para infiltrar
-Necesidad de cálculo de capacidad según intensidad de lluvias y volumen de agua a retener

Otras posibilidades

Estos materiales son amalgamas de gravas sin materiales finos y un material aglomerante.

Pueden ser de asfalto, de resinas sintéticas, e incluir distintos tipos de gravas: vidrio machacado, materiales plásticos, etc.

Son alternativos a otros sistemas de infiltración de agua en el suelo: zanjas vegetadas etc.

¿Dónde se puede poner?

•Aparcamientos grandes -centros comerciales, zonas industriales no contaminantes, áreas residenciales.
•Aparcamientos lineales- uso medio.
•Plazas grandes.
•Zonas peatonales donde la infiltración (si se desea infiltrar) no sea un problema para el suelo
•Vías de tráfico ligero o medio.

- Eficiencia +

Reducción de la Escorrentía

Especialmente diseñados para reducir la escorrentía y aumentar la infiltración.

Evapotranspiración y Temperatura

•Temperaturas más bajas que un pavimento equivalente sobre base de hormigón de noche y un día después de lluvias.
•Más altas en periodos de sequía durante el día.
•Puede variar según si tiene aditivos o no

Retención de la Contaminación

•Degradación total de contaminantes orgánicos si hay algo de nitrógeno disponible.
•Inmovilización de metales pesados 50-60%.
•Ninguna retención de cloruros (sal) -incompatible con la sal de nieve.
•Por lo general, se puede considerar que protegen los acuíferos.
•Es preferible realizar un seguimiento

Soporte para la vegetación

•Baja

Beneficio para el desarrollo de árboles

Solo mejora si:
•suelos "buenos" no compactados
•base y/o subbase granular realizada con suelos estructurales pero necesidad extra de agua en climas secos
•en algunos tipos de árboles en suelos arcillosos*
*probado para climas húmedos
•puede generar anaerósis en el suelo

Problemas principales

•Fenómeno de atasco o *clogging*: disminución de la infiltración a menos de los límites permitidos. Es bastante problemático en los pavimentos porosos.
•Baja infiltración de los suelos sobre los que se asienta
•Aumento de temperaturas en periodos de sequía

Soluciones posibles

•Al *clogging*: protección ante contaminantes periódicos (cubrir si hay obras en edificios cercanos), aspiradora de vacío (no muy efectiva). Efectividad limitada a largo plazo.
•A la infiltración limitada del suelo: Realizar zanjas, perforaciones para aumentar la infiltración.
•A la temperatura elevada:
Baldeo de superficies o mezcla de sistemas de captación con sistemas de infiltración para baldeo. O inclusión de materiales que retienen la humedad en su superficie o que aclaran la mezcla.

Patrimonio

Peligro si se instala cercano a cimentaciones de edificios, por creación de redes hídricas subterráneas (separación entre 2 y 6 m).

Contaminación acústica

Baja en la construcción y en la circulación.

Accesibilidad

Alta, pero no admitidos por ley en itinerarios peatonales accesibles.

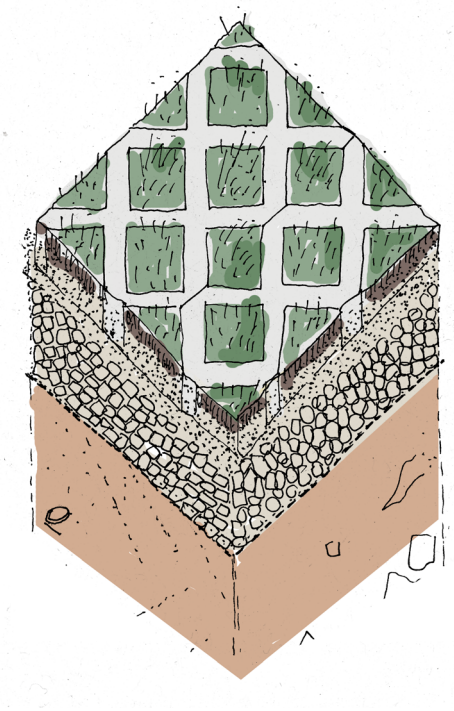
Recursos no renovables necesarios

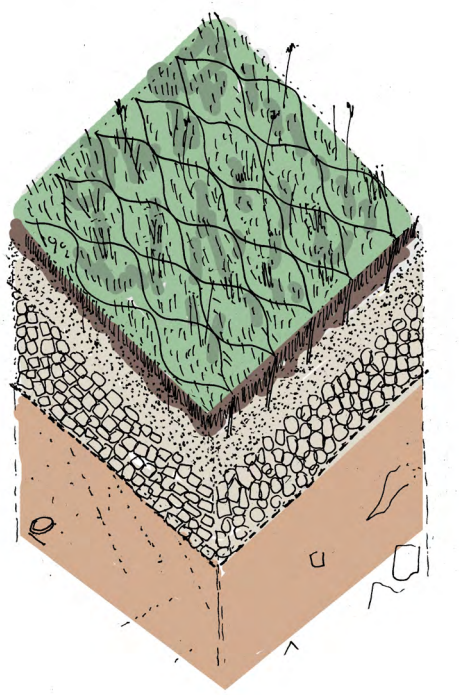
Aridos y resinas bituminosas: material contínuo
Gran cantidad de gravas; menor impacto si provienen de residuos de demolición inertes

Precio

40-50 E
Varía según método de gestión del espacio público y contabilización de beneficios.

Pavimentos permeables con vegetación





Construcción

Pavimentos permeables con vegetación

01 Pavimento de hormigón o de plástico prefabricado
02 Topsoil o tierra vegetal semillado
03 Base arenosa -Arenas de 2 a 5 mm- e= 30 mm
04 Subbase granular 20-63 mm (espesor según cantidad de agua que se desee infiltrar y precipitaciones)
05 Geotextil para evitar que la entrada de finos desde el suelo compactado

Objetivos de diseño

•Limitar la escorrentía de episodios torrenciales
•Mejorar la eficiencia de la red de drenaje existente
•Infiltrar agua en el subsuelo, detener o captar agua de lluvia
•Mejora de la temperatura y del ambiente urbano
•Mejora de la calidad ambiental

Los PP son los únicos que permiten al mismo tiempo cierta sostenibilidad y un tráfico ligero o medio sobre ellos.

Condicionantes

-Pendientes menores a 5%
-Nivel freático a más de un 1 metro de profundidad
-Suelo no contaminado
-Suelo infiltración alta (arenoso Ks> 10^{-6}) para infiltrar
-Necesidad de cálculo de capacidad según intensidad de lluvias y volumen de agua a retener
-Selección de variedades que no necesiten riego y aguanten periódos de sequía o riego necesario.

Otras posibilidades

Estos pavimentos con celdas -por lo general de plástico o de hormigón- con *topsoil* o suelo vegetal en las juntas.
La vegetación no tiene porque ser "hierba".
Existen muchos tipos de diseños de piezas. Las piezas plásticas pueden ser "invisibles", al quedar enrasadas con el suelo.
Son alternativos a otros sistemas de infiltración de agua en el suelo: zanjas vegetadas, etc.

¿Dónde se puede poner?

•Aparcamientos grandes -centros comerciales, zonas industriales no contaminantes, areas residenciales- con uso ocasional.
•Áreas de aparcamiento no muy transitadas
•Plazas grandes -zonas menos transitadas-
•Zonas peatonales donde la infiltración (si se desea infiltrar no sea un problema para el suelo) con bajo tránsito.

- Eficiencia +

Reducción de la Escorrentía

Especialmente diseñados para reducir la escorrentía y aumentar la infiltración.
La rugosidad de la vegetación favorece mucho la retención de agua en episodios de lluvia.

Evapotranspiración y Temperatura

•Temperaturas más bajas que el resto de pavimentos.
•Transpiración de los materiales.

Retención de la Contaminación

•Degradación total de contaminantes orgánicos si hay algo de nitrógeno disponible
•Inmovilización de metales pesados 50-60%.
•No retención de cloruros (sal) -incompatible verter sal con la vegetación.
•Por lo general, se puede considerar que protegen los acuíferos
•Captación de contaminantes del aire

Soporte para la vegetación

•Alta
•Si se desea puede tener cierta diversidad de especies vegetales -no tiene por qué ser césped
•Espacio limitado para el desarrollo radicular (10cm max)
•Preferiblemente especies que soporten el pisoteo o que se vean estimuladas por él
•Preferiblemente especies que soporten la sequía

Beneficio para el desarrollo de árboles

Solo mejora si:
•suelos "buenos" no compactados
•base y/o subbase granular realizada con suelos estructurales pero necesidad extra de agua en climas secos
•en algunos tipos de árboles en suelos arcillosos*
*probado para climas húmedos
•puede generar anaerósis en el suelo

Problemas principales

•Fenómeno de atasco o *clogging*: disminución de la infiltración a menos de los límites permitidos. Es bastante problemático en los pavimentos con vegetación si el topsoil o la tierra vegetal se pierde o se compacta.
•Degradación de la vegetación
•Baja infiltración de los suelos sobre los que se asienta

Soluciones posibles

•Al *clogging*: protección ante contaminantes periódicos (cubrir si hay obras en edicios cercanos), aspiradora de vacío (no muy efectiva). Efectividad limitada a largo plazo.
•A la infiltración limitada del suelo: realizar zanjas, perforaciones para aumentar la infiltración.
•A la pérdida de vegetación:
Selección de especies, riego ocasional, preferiblemente en zonas sombreadas, zonas con uso muy ligero, variables según especies

Patrimonio

Peligro si se instala cercano a cimentaciones de edificios, por creación de redes hídricas subterráneas (separación entre 2 y 6 m).

Contaminación acústica

Baja en la construcción y en la circulación.

Accesibilidad

Media: la vegetación es un limitante.

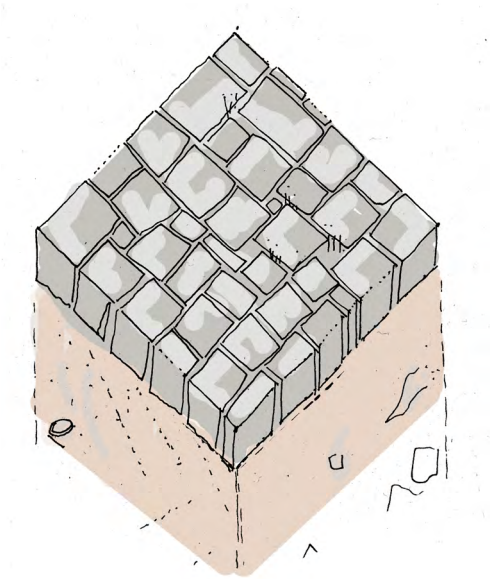
Recursos no renovables necesarios

Según material de aqui
Gran cantidad de gravas; menor impacto si provienen de residuos de demolición inertes

Precio

Mayor de 50-80 E
Varía según método de gestión del espacio público y especies y mantenimiento de la vegetación

Pavimentos tradicionales
adoquín pequeño -portugués-



Construcción

Adoquín portugués

01 Adoquín tamaño normalizado 4/5cm ó 5/7cm ó 9/11cm ó 12/13cm
02 Juntas rellenas con arenas finas
Respectivamente, 0,5cm ó 0,5/1cm ó 0,5/1,5cm ó 0,5/2cm
03 Lecho de arena, respectivamente 4/7cm ó 7/10cm ó 10/15cm ó 10/15cm
04 Suelo compactado

Objetivos de diseño

•Limitar la escorrentía en lluvias ligeras.
•Mejorar la eficiencia de la red de drenaje existente -para episodios de lluvia de poca intensidad
•Mejora de la calidad del espacio urbano -capacidad para hacer dibujos etc.
•Mejora de la temperatura y del ambiente urbano

Los PT, según las exigencias actuales en Madrid, tienen un uso limitado en los espacios públicos; pueden ser útiles para delimitar zonas de circulación respecto de zonas de descanso.

Condicionantes

-Necesidad de mano de obra muy especializada.
-Adoquines de piedras desiguales; no son resultado de procesos industrializados
-Accesibilidad reducida

Otras posibilidades

Mas allá del adoquín portugués, estas cuestiones se pueden asimilar para adoquines de poco espesor apoyados sobre una cama de arena sobre suelo compactado.

En este caso la superficie de juntas varía entre 15 y 25%.

¿Dónde se puede poner?

•Aceras, plazas, sin tránsito de vehículos, y combinados con recorridos accesibles : zonas entre alcorques, bordes de edificios, bordes de caminos, calles peatonales poco utilizadas.

Reducción de la Escorrentía

Estos pavimentos reducen de forma limitada la escorrentía -sólo en episodios de lluvia de muy baja intensidad.

Evapotranspiración y Temperatura

•Temperaturas más bajas que pavimentos impermeables
•Mayor si tiene vegetación.
-Equilibrio relativo del suelo con la atmósfera.

Retención de la Contaminación

•Baja infiltración, por lo que protege de la contaminación de acuíferos.
•Actividad biológica posiblemente ligada a la descomposición de contaminantes en las juntas.
•Si la base tiene un poco de cal, inmovilización de metales pesados.
•La rugosidad o vegetación permiten la captación de contaminantes del aire.

Soporte para la vegetación

•Alta a largo plazo- baja a corto plazo.
•La degradación del pavimento -ondulaciones- aumenta la diversidad potencial de hábitats.
•La vegetación puede degradar el pavimento si se establecen comunidades con raíces gruesas.
•Algunas estrategias -como las de Nantes- consisten en semillar y mantener estas "malas hierbas".

.

Beneficio para el desarrollo de árboles

•Mayor limitante al crecimiento: compactación
Sólo mejora si:
•suelos arenosos*
*probado para climas húmedos

Problemas principales

•Degradación física -pérdida de horizontalidad total
•Degradación por vegetación: levantamiento de piezas

Soluciones posibles

•A la degradación física: Prevención: mano de obra especializada, limitación de elementos pesados sobre el pavimento, aceptación de la irregularidad
•A la degradación por vegetación: Mantenimiento regular Semillar con especies que no puedan levantar el pavimento.

Patrimonio

Puede eliminar humedades en zonas cercanas a edificios tradicionales (según tipo de suelo y clima).

Contaminación acústica

Baja en la construcción y en la circulación - ya que no se circula con vehículos sobre ellos.

Accesibilidad

Media-baja: inestable. Posible su uso fuera de los itinerarios accesibles

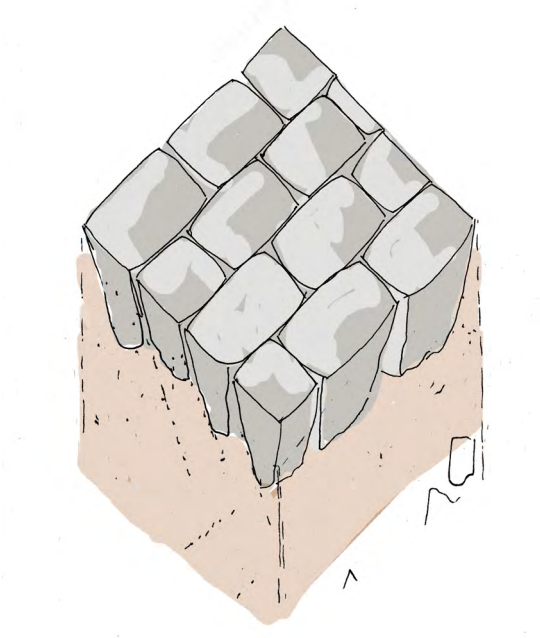
Recursos no renovables necesarios

Adoquines de granito, reutilizables.
Arena. Poco material respecto de otros pavimentos.

Precio

55-75 E
Varía según método de gestión del espacio público

Pavimentos tradicionales
adoquín “madrileño” o *sampietrino*



Construcción

Adoquín de granito
01 Adoquines con cara abombada e=14cm
02 Juntas rellenas con arena
03 Lecho de arena e=5cm
e=25cm
04 Zahorra artificial e=25cm (opcional)
04 Suelo compactado

Objetivos de diseño

•Limitar la escorrentía en lluvias ligeras.
•Mejorar la eficiencia de la red de drenaje existente -para episodios de lluvia de poca intensidad.
•Limitar el tránsito de vehículos y disminuir su velocidad
•Mejora de la temperatura y del ambiente urbano

Condicionantes

-Necesidad de mano de obra muy especializada.
-Adoquines de piedras desiguales no son resultado de procesos industrializados, pero están disponibles en Madrid
-Accesibilidad reducida

Otras posibilidades

Mas allá del adoquín "madrileño", estas cuestiones se pueden asimilar para adoquines de gran espesor apoyados hincados sobre el suelo o sobre una base granular, como los *sampietrini* de Roma.

En este caso la superficie de juntas varía entre 15 y 25%.

¿Dónde se puede poner?

•Aceras, plazas, sin o con tránsito de vehículos, y combinados con recorridos accesibles : zonas entre alcorques, bordes de edificios, bordes de caminos, calles peatonales de uso no intenso.
•Calles donde se quiera hacer descender el tránsito de véhiculos y la velocidad de los mismos.

Reducción de la Escorrentía

Estos pavimentos reducen de forma limitada la escorrentía -sólo en episodios de lluvia de muy baja intensidad.

Evapotranspiración y Temperatura

•Temperaturas más bajas que pavimentos impermeables
•Mayor si tiene vegetación.
-Cuanto más espesor, menos reducción de la temperatura respecto de pavimentos impermeables.

Retención de la Contaminación

•Baja infiltración por lo que protege de la contaminación de acuíferos.
•Actividad biológica posiblemente ligada a la descomposicón de contaminantes en las juntas.
•Si la base tiene un poco de cal, inmovilización de metales pesados.
•La rugosidad o vegetación permiten la captación de contaminantes del aire.

Soporte para la vegetación

•Alta a largo plazo; baja a corto plazo
•La degradación del pavimento -ondulaciones- aumenta la diversidad potencial de habitats.
•Más o menos estable ante especies con raíces leñosas.
•Algunas estrategias -como las de Nantes- consisten en semillar y mantener estas "malas hierbas".

.

Beneficio para el desarrollo de árboles

•Mayor limitante al crecimiento: compactación
Sólo mejora si:
•suelos arenosos*
*probado para climas húmedos

Problemas principales

•Degradación física -pérdida de horizontalidad total.
•Ruido si los vehículos circulan a alta velocidad

Soluciones posibles

•A la degradación física: Prevención: mano de obra especializada. Cuidado periódico. Limitación del peso de algunos vehículos.
•Al ruido de los vehiculos: Limitación de la velocidad -medidas complementarias.
•Baja protección de escorrentía: Combinarlo con otros sistemas

Patrimonio

Puede eliminar humedades en zonas cercanas a edificios tradicionales (según tipo de suelo y clima).

Contaminación acústica

Baja en la construcción y muy alta en lo que respecta a la circulación de vehículos

Accesibilidad

Media-baja: inestable. Posible su uso fuera de los itinerarios accesibles o en plazas de aparcamiento lineales.

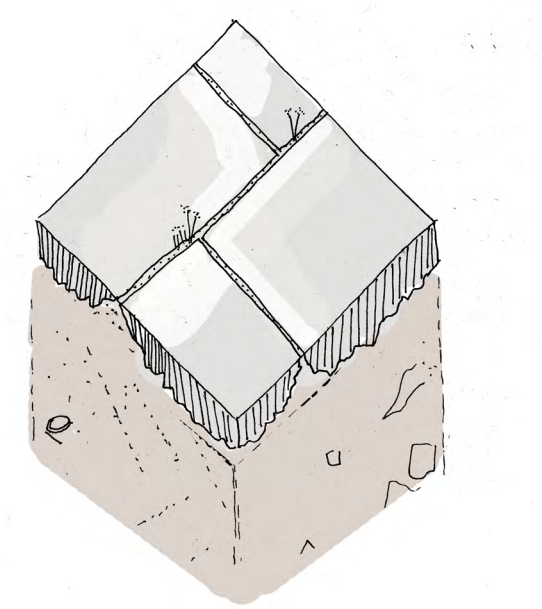
Recursos no renovables necesarios

Adoquines de granito, reutilizables y presentes bajo las calzadas en algunas áreas de Madrid

Precio

80-90 E
Varía según método de gestión del espacio público. Menor si se dispone del material.

Pavimentos tradicionales
losas o piezas grandes



Construcción

Enlosado
01 Losas -Labradas o lajas de piedra apenas debastadas, buscando aparejar los instersticios existentes
02 Juntas rellenas con arena
03 Lecho de arena
04 Suelo compactado
(Mileto y Vegas, 2017)

Objetivos de diseño

•Establecer suelos planos, accesibles y prácticamente impermeables, al mismo tiempo que desmontables (con maquinaria)

.

Condicionantes

-Necesidad de mano de obra especializada.
-Losas de tamaño desigual y rugosidad en la parte apenas devastada para asegurar su fijación en el suelo

Otras posibilidades

Estas losas pueden tener un comportamiento ambiental similar a la mampostería ciclópea usada en pavimentos (Berlín).

En este caso la superficie de juntas varía entre un 2 y 5%.

¿Dónde se puede poner?

•Aceras, plazas sin tránsito de vehículos, y como recorridos accesibles o fuera de ellos. Espacios peatonales con tráfico de vehículos ocasional. La capacidad para soportar el tráfico depende mucho del espesor de las losas y del espesor y materiales del lecho.

Reducción de la Escorrentía

Estos pavimentos reducen de forma extremadamente limitada la escorrentía -sólo en episodios de lluvia de muy baja intensidad.

Evapotranspiración y Temperatura

•Temperaturas más bajas que pavimentos impermeables
•Mayor si tiene vegetación.
•Cuanto más espesor, menor reducción de la temperatura respecto de pavimentos impermeables.

Retención de la Contaminación

•Baja infiltración, por lo que protege de la contaminación de acuíferos.
•Actividad biológica posiblemente ligada a la descomposicón de contaminantes en las juntas.

Soporte para la vegetación

•Media a largo plazo; baja a corto plazo.
•Muy estable ante especies con raices leñosas.
•Algunas estrategias -como las de Nantes- consisten en semillar y mantener las "malas hierbas" de las juntas.

Beneficio para el desarrollo de árboles

•Mayor limitante al crecimiento: compactación
Sólo mejora si:
•suelos arenosos*
*probado para climas húmedos

Problemas principales

•Peso de la pieza
•Ruptura por flexión en el centro de la pieza

Soluciones posibles

•Al peso: Necesidad de maquinaria para la restauración.
•A la ruptura: relación entre canto y superficie adecuada, mano de obra especializada en la elaboración.

Patrimonio

Puede eliminar humedades en zonas cercanas a edificios tradicionales (según tipo de suelo y clima).

Contaminación acústica

Baja en la construcción y baja en lo que respecta a la circulación de vehículos (sólo soporta tráfico ocasional).

Accesibilidad

Alta. Sin embargo, prohíbido su uso en intinerarios accesibles.

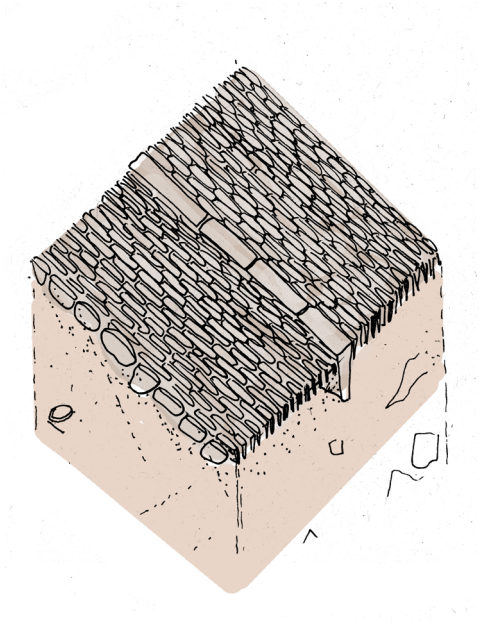
Recursos no renovables necesarios

Gran cantidad de granito necesario para su fabricación.

Precio

Más de 100 E
Varía según método de gestión del espacio público.

Pavimentos tradicionales
Cantos de morro | Chino cordobés



Construcción

01 Cantos que van desde los 3 cm en su dirección mayor hasta los 8 cm colocados con un mazo de goma o de madera
02 Lecho de arena con muy poca cal -regado al final de la ejecución del pavimento. Semillado para contribuir a la fijación del pavimento y para conseguir un prado en primavera
03 Perímetro rígido
04 Regado pulverizado con una manguera para el fraguado
05 Lecho de mortero de arena con muy poca cal. Espesor variable según guijarros.
06 Suelo compactado

Objetivos de diseño

•Establecer superficies de gran valor artístico y ambiental para uso peatonal poco intenso - o muy cuidadoso.
•Mejora de la temperatura
•Infiltración parcial de agua

Condicionantes

-Necesidad de mano de obra muy especializada.
-Chinos o Cantos de tamaño desigual, recogidos y seleccionados en canteras de cantos de ríos.

Otras posibilidades

Estos pavimentos son caros, por lo que se suele limitar su uso; sin embargo, son un ejemplo de diseño ambiental absolutamente optimizado con un mínimo de recursos y un máximo de beneficios ambientales y paisajísticos.

¿Dónde se puede poner?

•Aceras, plazas, sin tránsito de vehículos, y combinados con recorridos accesibles : zonas entre alcorques, bordes de edificios, bordes de caminos, calles peatonales de uso no intenso.

Reducción de la Escorrentía

Estos pavimentos reducen de forma relativamente limitada la escorrentía -posiblemente sea mayor que la mayoría de los PT, pero desconocida.

Evapotranspiración y Temperatura

•Temperaturas más bajas que pavimentos impermeables y que el resto de PT
•Mayor si tiene vegetación.

Retención de la Contaminación

•Baja infiltración, por lo que protege de la contaminación de acuíferos.
•Actividad biológica posiblemente ligada a la descomposicón de contaminantes en las juntas.
•Si la base tiene un poco de cal, inmovilización de metales pesados.
•La rugosidad o vegetación permiten la captación de contaminantes del aire.

Soporte para la vegetación

•Vegetación integrada en el diseño como método de protección ante especies con raíces leñosas.
•La vegetación y el pavimento actúan como "simbiontes" y se ayudan mutuamente.

Beneficio para el desarrollo de árboles

•Mayor limitante al crecimiento: compactación
Sólo mejora si:
•suelos arenosos*
*probado para climas húmedos

Problemas principales

•Fragilidad y alto coste

Soluciones posibles

•Buscar sistemas constructivos que ofrezcan los mismos servicios ecosistémicos y que sean parcialmente sistematizables.

Patrimonio

Puede eliminar humedades en zonas cercanas a edificios tradicionales (según tipo de suelo y clima).

Contaminación acústica

Baja en la construcción y baja en lo que respecta a la circulación (no soporta vehículos).

Accesibilidad

Media baja.

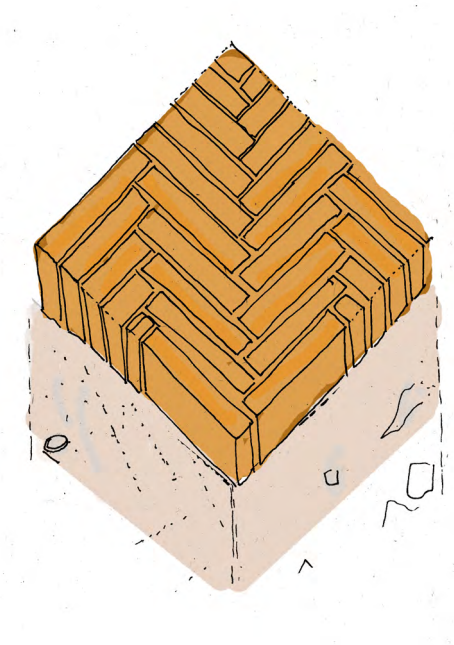
Recursos no renovables necesarios

Poca cantidad de cantos por unidad de superficie, reutilizables.

Precio

Más de 100 E
Varía según método de gestión del espacio público.

Pavimentos tradicionales cerámicos



Construcción

Solado de ladrillo (hipotesis)

01 Ladrillo cerámico macizo
02 Juntas de mortero de cal
03 Base de mortero de cal
04 Tal vez -Base granular y Suelo compactado

Objetivos de diseño

•Mejora de la temperatura.
•Retención de la humedad.
•Infiltración parcial de agua

.

Condicionantes

-Ladrillos "tradicionales" para implicaciones ambientales -prohibidos por heladicidad- (No ladrillos Klinker ni hidrofugados).
-Jardines privados
-Lugares cubiertos y protegidos de la lluvia y de la temperatura de frío extremo o climas mas calientes que los de Madrid.

Otras posibilidades

Otros materiales que permitan el ascenso de agua por capilaridad y que resistan ciclos de hielo y deshielo. Utilización de ladrillos reciclados como gravas de PP.

¿Dónde se puede poner?

- Por normativa, no es posible ponerlo en espacios urbanos de libre acceso.

Reducción de la Escorrentía

Estos pavimentos reducen de forma limitada la escorrentía

Evapotranspiración y Temperatura

•Temperaturas más bajas que pavimentos impermeables y que el resto de PT
•Mayor si tiene vegetación.

Retención de la Contaminación

•Baja infiltración por lo que protege de la contaminación de acuíferos.
•Posible sorción de contaminantes
•Si la base tiene un poco de cal, inmovilización de metales pesados.
•La rugosidad o vegetación permiten la captación de contaminantes del aire.

Soporte para la vegetación

•A largo plazo, la degradación de este tipo de pavimentos y su capacidad para retener la humedad permiten el desarrollo de ciertos tipos de vegetación, musgos y liquenes.

Beneficio para el desarrollo de árboles

•Mayor limitante al crecimiento: compactación
Solo mejora si:
•suelos arenosos*
*probado para climas húmedos

Problemas principales

•Heladicidad

Soluciones posibles

•Introducirlo en áreas sin riesgo de heladicidad.

Patrimonio

Puede eliminar humedades en zonas cercanas a edificios tradicionales (según tipo de suelo y clima).

Contaminación acústica

Baja en la construcción y media en lo que respecta a la circulación (soporta vehículos ocasionales).

Accesibilidad

Nula en climas fríos: muy resbaladizo.

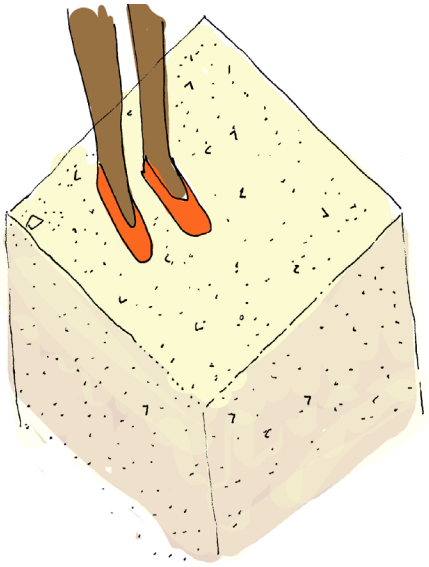
Recursos no renovables necesarios

Ladrillos con baja cocción, reutilizables si juntas de cal.

Precio

Más de 100 E
Varía según método de gestión del espacio público.

Terrizos
Mezclas arcillosas a arenosas



Construcción

Areas de terrizo peatonales

01 Mezcla de arenas, arcillas y limos compactada
02 Suelo compactado

Caminos de terrizo

01 Capa de arena fina compactada
02 Subbase granular e=20 o 25 cm
03 Suelo compactado

Objetivos de diseño

•Generar áreas de aspecto "natural".
•Mejorar la temperatura
•Infiltrar parte del agua de lluvia

.

Condicionantes

-La proporción de arenas, limos y arcillas es determinante para su comportamiento.
-Aunque no existe pendiente límite, a partir de una determinada pendiente tienden a erosionarse con el agua. En periodos secos pueden estar sometidos a procesos de deflación (erosión eólica); por ello, en días secos, es recomendable humedecerlos ligeramente.
-Es preferible ponerlos a la sombra de árboles.

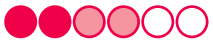
Otras posibilidades

Estos pavimentos se pueden considerar "sucios" o polvorientos; por ello se tienden a utilizar "terrizos estabilizados" con un aglomerante polimérico. Estos terrizos estabilizados son impermeables y no retienen prácticamente nada de humedad, por ello no son estudiados en este documento.
Es posible que introducir una base y una superficie con una mezcla adecuada -por ejemplo de jabre- mejore la resistencia y disminuya la erosión.

¿Dónde se puede poner?

•Plazas con árboles, paseos ó bulevares, combinados con recorridos accesibles.
•Caminos de parques o caminos "naturalizados".

Reducción de la Escorrentía



Depende de la mezcla de arcillas y arenas: alta en las mezclas muy arenosas, baja en las mezclas arcillosas. Depende de la forma del espacio urbano donde esté instalado.

Evapotranspiración y Temperatura

Depende de la mezcla de arcillas y arenas: baja evaporación y alta temperatura en las mezclas muy arenosas, baja temperatura y alta evaporación en las mezclas arcillosas.

Retención de la Contaminación

•Baja infiltración, por lo que protege de la contaminación de acuíferos.
•Se puede producir actividad biológica que descomponga materia orgánica.
•Posible foco de contaminación si no está correctamente mantenido.
•Materiales básicos inmovilizan metales pesados

Soporte para la vegetación

•Vegetación integrada en el diseño como método de protección ante especies con raíces leñosas.
•La vegetación y el pavimento actúan como "simbiontes" y se ayudan mutuamente.
.

Beneficio para el desarrollo de árboles

•Mayor limitante al crecimiento: compactación
Sólo mejora si:
•suelos arenosos*
*probado para climas húmedos
•Capacidad para generar ambientes húmedos.

Problemas principales

•Erosión y formación de regueros.
•Deflación y contaminación del aire
•Por lo general, falta de aprecio "social"
•Origen de contaminantes atmosféricos para pavimentos permeables

Soluciones posibles

•A la erosión: En el diseño, permitir que parte del agua discurra por la superficie y sea evacuada; no diseñar grandes superficies lisas. Estudiar la posibilidad de integrar geoformas en el diseño de caminos o superficies.
•A la deflación: Situarlos en la sombra de árboles para evitar la sequedad extrema y regar ligeramente
•A la erosión y la deflación: Introducir bases parcialmente drenantes y generar mezclas adecuadas.
•A la degradación de los PP: No ponerlos, en ningun caso, cercanos a los PP.

Patrimonio

Puede eliminar humedades en zonas cercanas a edificios tradicionales (según tipo de suelo y clima).

Contaminación acústica

Baja en la construcción y media en lo que respecta a la circulación (soporta vehículos ocasionales).

Accesibilidad

Depende de la granulometría del suelo y del mantenimiento.

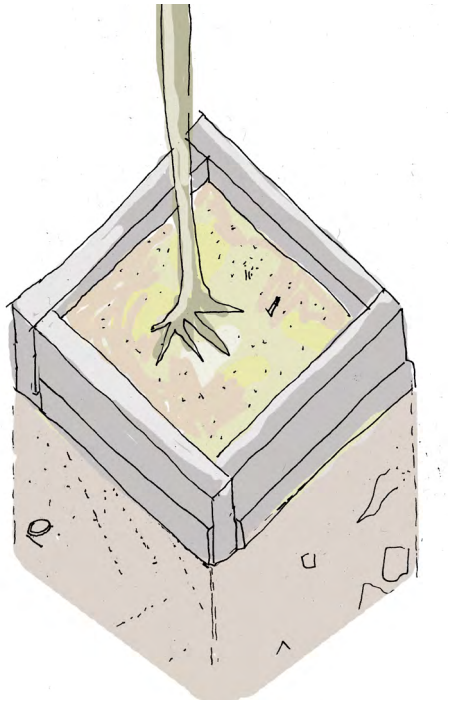
Recursos no renovables necesarios

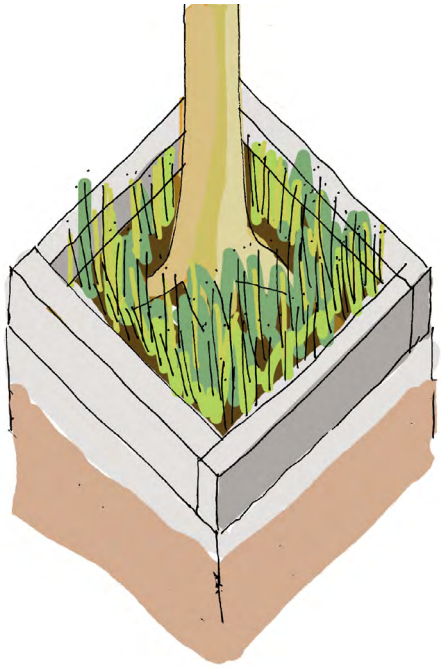
Áridos y finos. Menor impacto si son reciclados.

Precio

10-20 E
Varía según método de gestión del espacio público.

Alcorques
Según mantenimiento





Construcción

Ver apartado alcorques p. 36 a 38.

Los alcorques no son un pavimento ya que su uso no implica una actividad. Sin embargo conviene estudiarlos conjuntamente con los pavimentos para comprender la capacidad que tienen de influir en la ciudad y en los temas referidos al pavimento.

Objetivos de diseño

•Servir al crecimiento de los árboles
•Captar el agua de escorrentía
•Mejorar la calidad espacial urbana

.

Condicionantes

-El tamaño, la forma y la cantidad y calidad de suelo "contenido" o ligado a los alcorques es determinante para el crecimiento de los árboles.
-Actualmente se "descompactan" una vez al año -no teniendo en cuenta que se pisan constantemente- y se elimina la vegetación espontánea.
-Suelen configurar una pequeña depresión respecto del pavimento para captar el agua.

Otras posibilidades

El diseño urbano ofrece cientos de posibilidad de "alcorque" (ver apartado vegetación) que en muchos casos son "agujeros" en el pavimento.

En Roma y en Antwerp, se pueden observar enredaderas que suben por la fachada de los edificios y se enrollan en cables tendidos entre fachadas en calles muy estrechas generando "muros colgantes".

¿Dónde no sé deben poner?

• Se deben instalar preferiblemente fuera de los itinerarios accesibles, maximizando la cantidad de suelo sin compactar.
• Cuando el pavimento bordea un parque, es siempre preferible que el árbol se encuentre dentro del parque en vez de sobre la acera.

Reducción de la Escorrentía

Aunque depende de la depresión que configuren respecto de la acera, y del nivel de compactación, los alcorques son zonas de infiltración de la escorrentía -para la detención. Sin embargo, gran parte de ellos estan tan compactados que no infiltran todo el agua que reciben. La vegetación permitiría aumentar la infiltración.

Evapotranspiración y Temperatura

La introducción de vegetación puede permitir evaporar agua en los "niveles" más bajos de la calle, sin embargo no se tienen datos claros de como podría influir esto de forma global en la temperatura.

Retención de la Contaminación

•Cuanta mas actividad biológica, mas descomposición de contaminantes organicos, por ello es prefereible introducir vegetación en ellos.

Soporte para la vegetación

•La vegetación se desarrolla espontáneamente en muchos alcorques, sobre todo en aquellos cercanos a parques o focos de semillas.
•No existen datos claros de en qué medida el desarrollo de vegetación en alcorques puede disminuir o facilitar el crecimiento de los árboles.

Beneficio para el desarrollo de árboles

•Los alcorques son los espacios que permiten el crecimiento de árboles. La influencia del diseño de pavimento y alcorque sobre los árboles se resume en el apartado de Vegetación.
•Aunque no existen datos claros de en qué medida el desarrollo de vegetación en alcorques puede facilitar el crecimiento de los árboles, es posible que la aireación de las raíces y el riego continuado favorezcan una mejora en los árboles.

Problemas principales

•Compactación.
•Tal vez contaminación.
•Límites fijos que impiden "una evolución" del alcorque si los árboles lo necesitan.

Soluciones posibles

•A la compactación: Descompactar y favorecer el establecimiento de malas hierbas o de especies de herbáceas o arbustos.

•A la contaminación: Evaluar los orígenes de la contaminación de alcorques y desde que enfoques se puede limitar. Favorecer la actividad biológica

•Pensar en límites de alcorque menos "formales" y mas flexibles con el desarrollo de los árboles.

Patrimonio

Es necesario adaptar el diseño de vegetación al espacio urbano.

Contaminación acústica

-

Accesibilidad

Es preferible, tanto para la accesibilidad como para el desarrollo de vegetación que se encuentren fuera de los itinerarios peatonales.

Recursos no renovables necesarios

Gran cantidad de recursos utilizados actualmente en las piezas que bordean los alcorques.

Precio

-

Varía según método de gestión del espacio público.

Conclusiones (I)

El diseño y la gestión del suelo en las ciudades tiene grandes consecuencias en el medio ambiente urbano. Una gestión sostenible del suelo urbano implica tener en cuenta aspectos ambientales en el diseño del pavimento y del espacio público.

Para ello, la primera medida es minimizar al máximo las superficies pavimentadas, favoreciendo desarrollos urbanos que, aún siendo densos y ofreciendo calidad del espacio público, minimicen el sellado de suelo. No existe ningún pavimento que pueda ofrecer la totalidad de los servicios ecosistémicos que pueda tener un suelo sin pavimentar. Es urgente actuar en este sentido tanto en el espacio público como en el privado.

Respecto de la elección del pavimento, es importante destacar que no existe una solución única e "ideal" que permita resolver todos los problemas ligados a la gestión de las superficies del espacio público. Probablemente la "mejor" solución se base en combinar y coordinar distintos elementos, tratando de configurar un sistema coherente que integre y organice los distintos usos, la movilidad y los aspectos ambientales.

Por otra parte, parece probable que en los próximos años se lleven a cabo distintos proyectos de regeneración urbana. Por ello, para incluir una perspectiva sostenible, es imprescindible partir desde lo existente y no desde el pavimento teóricamente "óptimo" para un lugar determinado. Limitar el consumo de recursos y seguir principios de intervención mínima es sin duda uno de los retos más importantes en la regeneración urbana.

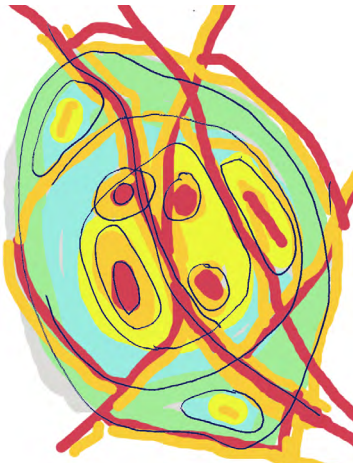
Finalmente, parece necesario involucrar a la población y hacerla partícipe -o al menos conocedora- de los cambios que se realizan en el espacio público. La difusión y participación son cada vez mas necesarias para asegurar la resiliencia y la sostenibilidad.

La intervención en el pavimento está ligada a la movilidad, a la gestión del espacio público y al modelo de ciudad. Por ello es importante tener en cuenta que, si no se puede modificar ninguno de estos tres elementos, la capacidad de introducir pavimentos distintos de los actuales es limitada; y que una intervención de calidad debe, también, tratar de modificar o al menos tener en cuenta estos aspectos.

Conclusiones (II)

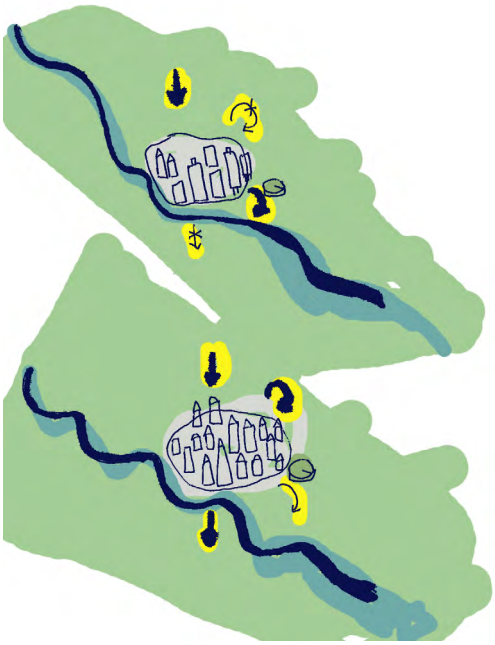
En este apartado se resumen líneas de trabajo o de investigación que podrían ponerse en práctica, según los documentos e iniciativas relacionadas con el pavimento descritas en este documento.

Las líneas de trabajo a escala urbana y territorial o intermedia son las más relevantes. Sin embargo, las propuestas a escala de detalle son estrategia puntuales que pueden ser útiles, siempre que se integren dentro de un proyecto global. Conllevan un cambio importante del paisaje urbano.



Escala urbana y territorial

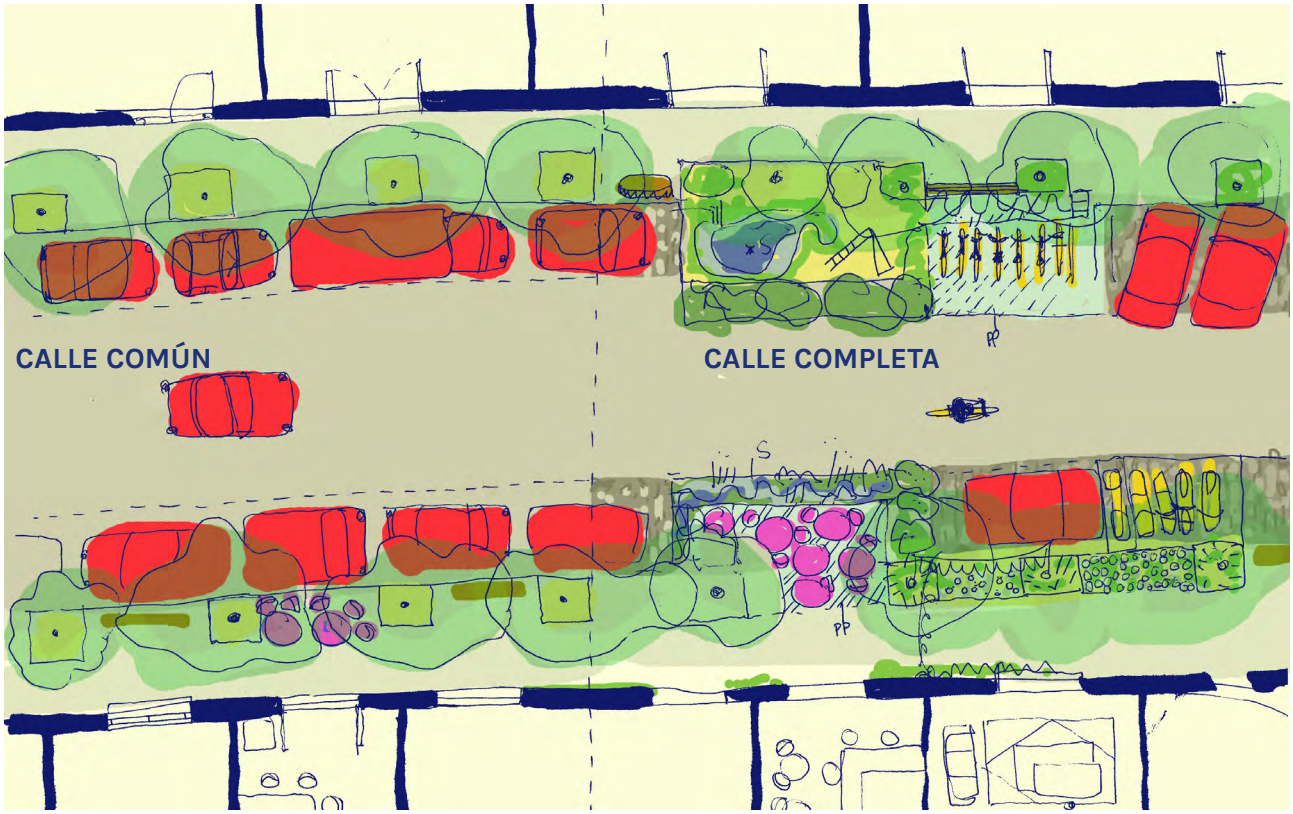
SUELOS CONTAMINADOS
-Analizar o evaluar en qué zonas puede haber suelos contaminados. Determinar zonas preferentes de infiltración.
-Evaluar si las variaciones en el nivel freático producidas por la introducción de SUDs pueden transferir la contaminación del suelo al agua.



IMPACTO A ESCALA URBANA Y TERRITORIAL
Evaluar la posibilidad, viabilidad e impacto de introducir SUDs a escala urbana y a escala de cuenca hídrica.

MINIMIZAR EL SELLADO DE SUELOS
Buscar espacios de oportunidad para "des-sellar" el suelo - a todas las escalas. y tanto en espacios privados como públicos.

Escala intermedia | Calles completas

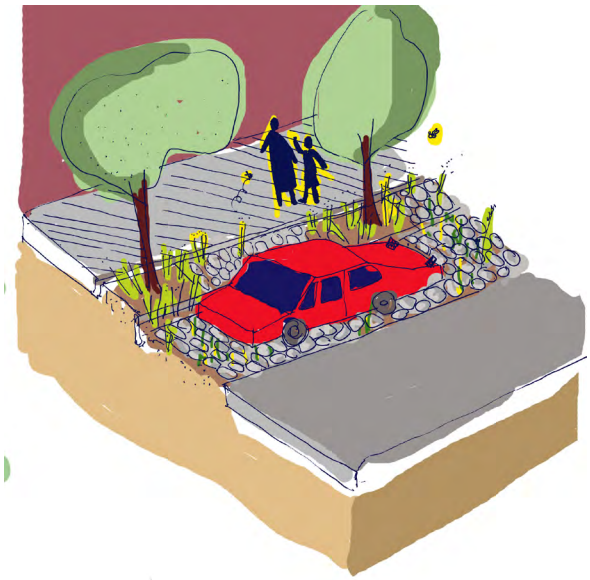


CALLES COMPLETAS
DISEÑAR CALLES COMPLETAS QUE INTEGREN MOVILIDAD, MEDIO AMBIENTE Y ESPACIO PÚBLICO.

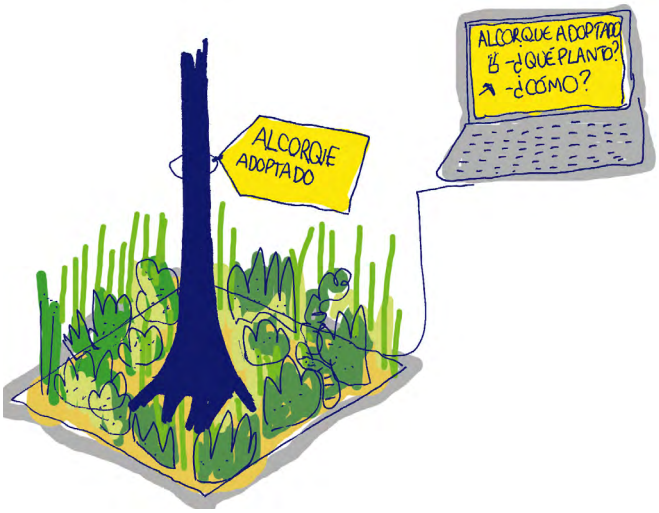
-Dimensionado estricto de vías de circulación y disminución del tráfico.
-Des-sellado de áreas en que no sea necesario.
-Introducción, evaluación y seguimiento de distintos SUDs (jardines de lluvia, pozos de infiltración, pavimentos permeables).
-Evaluación de sistemas que permitan captar agua para baldeo y para riego.
-Optimización del diseño de pavimentos para minimizar el consumo de recursos, gestionar el agua de forma más eficiente y aumentar la biodiversidad.
-Poner en práctica técnicas que impliquen la mejora y cuidado coordinado del espacio público incluyendo tanto a los vecinos como a los agentes locales.
-Estudiar alternativas de gestión del espacio público, que permitan, aún aumentando los costes de mantenimiento, disminuir los costes en grandes infraestructuras.

Documento de referencia:
Boston complete streets (BCS, 2013)

Escala de detalle

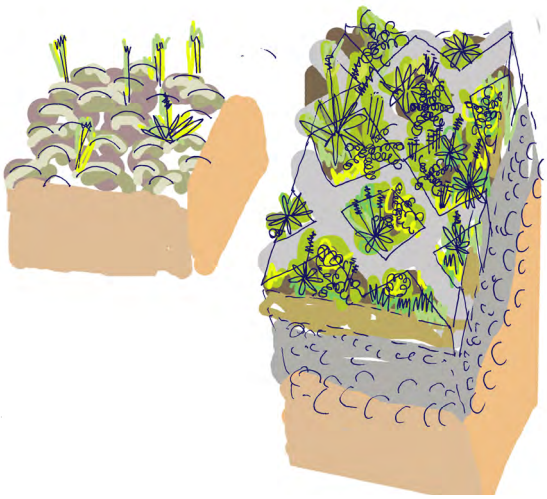


ADOQUINES ENTERRADOS
Realizar espacios públicos o aparcamiento lineales que permitan reintroducir adoquines "madrileños" en la ciudad de forma sistemática y formar a instaladores para su ejecución.
Idea original: Jose Molina Terrén

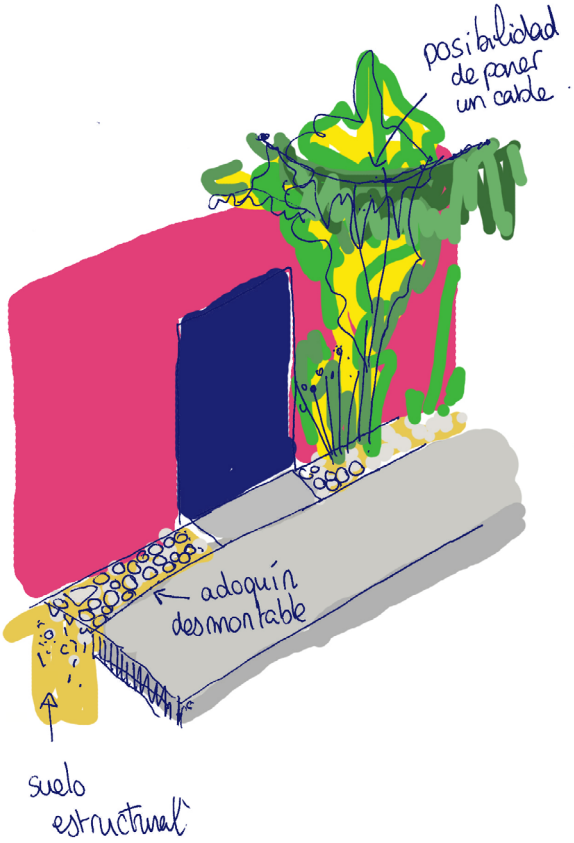


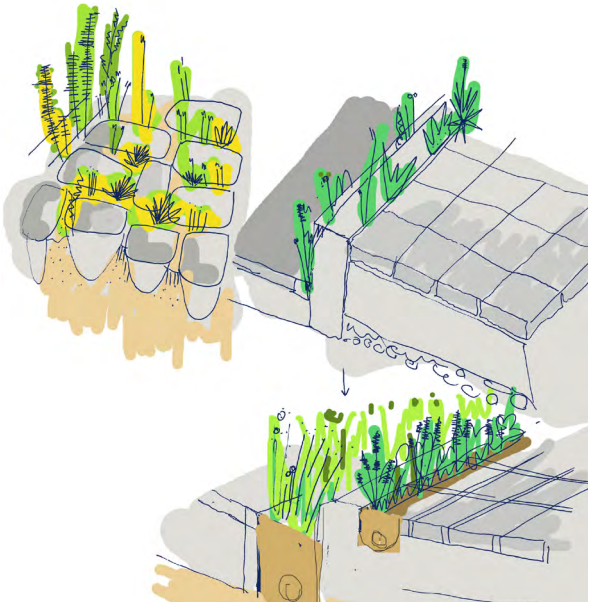
ALCORQUES
Poner en marcha sistemas de adopción de alcorques por parte de los vecinos -sistemas de aviso, manuales de vegetación prioritaria, indicaciones y recomendaciones.
Proyecto de referencia: Ayuntamiento de Amberes (Antwerp)

TERRIZOS
Optimizar los terrizos que no estan construidos sobre una base de grava y las "canaletas" laterales. Estudiar la posibilidad de establecerlos con geoformas, y con distintos tipos de vegetación.



VEGETACIÓN PAVIMENTOS
Estudiar y analizar tipos de vegetación que puedan soportar el pisoteo y largos periódos de sequía, para integrarlos en distintos tipos de pavimentos
Documentos de referencia: Olivier Filippi





CALLES ESTRECHAS
Poner en marcha, en calles estrechas, sistemas que permitan el crecimiento de enredaderas en fachada - a través del desmontaje de algunos adoquines y la incorporación de suelos estructurales. Introducir las bases para permitir tender cables entre fachadas para hacer columnas vegetales. Evaluar y estudiar los distintos tipos de vegetación que se establecen, el mantenimiento que requieren.
Proyecto de referencia: Ayuntamiento de Antwerp

`MALAS´ HIERBAS
Dar un valor a las hierbas espontáneas, evaluar su impacto en los distintos tipos de pavimentos.
Estudiar los espacios en que se desarrollan hierbas como espacios de oportunidad donde se podrían realizar acciones puntuales que permitieran una mejora significativa del paisaje urbano.
Proyecto de referencia: Ayuntamiento de Nantes, Frédérique Soulard y Universidad de Copenhague,

Bibliografía

Artículos de investigación, Tesis doctorales y Trabajos fin de Master

Alsubih M, Arthur S, Wright G. 2013 Experimental study on hydrological performance of a permeable pavement Novatech 2013

Asaeda T., Vu T.C. 1992 The subsurface transport of heat and moisture and its effect on the environment: a numerical model Boundary Layer Meteorol

Asaeda T., Vu T.C., Wake A. 1996 Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere Atmosferic Environment

Asaeda T., Vu T.C. 2000 Characteristics of permeable pavement during hot summer weather and impact on the thermal environment Building and Environment

Bean E.Z., Hunt W.F., Bidelspach D.A. Study on the surface infiltration rate of permeable pavement

Bear I.J.; Thomas, R.G. 1964 Nature of argillaceous odour. Nature Lond. 201, 993-995

Bear I.J.; Thomas, R.G. 1965 Petrichor and Plant growth. Nature, Lond.207 1415-1416

Bear I.J.; Thomas, R.G. 1966 Genesis of Petricor, Nature, Geochimica et Cosmochimica Acta, Volume 30, Issue 9, September 1966, Pages 869-879

Berry, C.T. (1995) Control of urban runoff through the use of permeable pavements. Unpublished PhD Thesis. Coventry University

Booth D. Leavitt J. 1999 Field Evaluation of Permeable Pavement Systems for Improved Stormwatr Management Journal of the American Planning Association

Bühler O., Kristoffersen P. and Larsen S., 2007 Growth of Street Trees in Copenhaguen with Emphasis on the Effect of Different Establishment Concepts, Arboriculture and Urban Forestry, 33(5): 330-370

Castro D., Gónzalez-Angullo N., Rodríguez J, Calzada M. 2007 The influence on paving block shape on the infiltration capacity of permeable paving Land contamination and reclamation

Coldewey W.G., Göbel P. 2010 Concept for near-natural storm water control in urban areas Environment, Earth Science

Day S., Watson G., Wiseman E., Harris J.R. 2009 Causes and consequences of deep structural roots in urban trees: from nursery production to landscape establishement Arboriculture & Urban Forestry, 35(4): 182-191

Drake, J.; Marsalek, J. 2013 Review of environmental performance of permeable pavement systems: State of the knowledge. Water Quality Research Journal of Canada 48.3 203-222

Ferguson B.K. 2006 Porous pavements: The making of progress in technology and design 2006 8Th International Conference on Concrete Block Paving

Field R., Masters H., Singer M. 1981 Status of porous Pavement Research, Water Res.

Grabosky, J. 1996. Developing a structural soil material with high bearing strength and increased rooting volumes for street trees under sidewalks. Master's Thesis. Department of Horticulture, Cornell University

Grabosky, J. and N. Bassuk, 2008. Sixth- and tenth- year growth measurements for three tree species in a load-bearing stone-soil blend under pavement and a tree lawn in Brooklyn, NY, U.S. Arboriculture & Urban Forestry, 34(4): 265-266.

Göbel, P, et al. 2004 Near-natural stormwater management and its effects on the water budget and groundwater surface in urban areas taking account of the hydrogeological conditions; Journal of Hydrology 299 267-283

Göbel, P.; Dierkes, C.; Coldewey W.G. 2007 Stormwater runoff concentration matrix for urban areas, Journal of Contaminant Hydrology, 91 26-42

Gobel P., Starke P, Voss A., Coldewey W.G. 2013 Field measurements of evapotranspiration rates on seven pervious concrete pavement systems Novatech 2013

Gobel P., Starke P, Messer J., Coldewey W.G 2013 Urban water budget of evaporation-optimized concrete pervious pavements Novatech 2013

Gonzálvez del Pino, 2014 Viabilidad de las plantas de los espartales y jarales para la construcción de techos verdes en clima mediterráneo continental, Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas, Universidad de Alcalá de Henares.

H Li, J.T. Harvey, T J Holland, M Kayhanian 2013 The use of reflective and permeable pavements as potential practice for heat island mitigation and stormwater management Environmental Research Letters

Hollenbeck I., Göbel P. 2013 Water-permeable pavements as the sole storm water management strategy -problems and possibilities Novatech 2013

Jack-Scott, E.J., 2012 Survival and Growth Factors Affecting Community-Planted Urban Street Trees, Cities and the Environment (CATE): Vol4: Iss. 1, Article 10

Joung, Y.S.; Buie C.R., 2014, Aerosol generation by raindrop impact on soil, Nature communications DOI: 10.1038/ncomms7083

Lucke T., Beecham S. 2013 An Investigation into the differences in infiltration capacity between porous and permeable concrete pavers installed on sloping sub-catchments Novatech 2013

Lucke T., Beecham S., Boogaard F., Myers B.2013 (2); Are infiltration Capacities of Clogged permeable Pavements still acceptable? Novatech 2013

Morgenroth J. Buchan G.D. 2009 Soil Moisture and Aeration beneath Pervious and Impervious Pavements, Arboriculture and Urban Forestry, 35(3): 135-141

Morgenroth J., Visser R.;2011 Aboveground growth response of Platanus orientalis to Porous Pavements, Arboriculture and Urban Forestry, 37(1): 1-5

Mullaney J., Lucke T., Trueman S.J., 2015 The effect of permeable pavements with an underlying base layer on the growth and nutrient status of urban trees, Urban Forestry & Urban Greening, 14 19-29

Nakayama, T and Fujita, T. Cooling effect of Water Holding pavements made of ney materials and Heat Budgets in Urban Areas. Landscape and Urban planning, 201, vol 96 n02. pp57-67

Novo A.V., Gomez-Ullate E., Bayon J.R., Castro Fresno D., Rodríguez-Hernández J. 2010 Monitoring and evaluation of thermal behaviour of permeable pavements under the northern Spain climate Novatech 2010

Pavao-Zuckermann M. 2008 The Nature of Urban Soils and their role in Ecological Restoration in Cities, Restoration Ecology, 642-649

Pezzaniti D., Beecham S., Kandasamy J., 2009 Influence of clogging on the effective life of permeable pavements Journal of Water Management

Pomerantz,M., Pon B., Akbari, H., Chang S.C. 2000 The Effect of Pavements' Temperatures On Air Temperatures in Large Cities LBNL report

Pratt, C.J., Mantle, J.D. Schofield, P.A. 1995. UK research into the performance of permeable pavement, reservoir structures in controlling stormwater discharge quantity and quality. Water Science and Technology, 32 (1) 63-69

Sanders J. Gabrosky J. 2014 Does reduced soil area change overall tree growth?, Urban forestry and Urban Greening 13 295-303

Sanders J. Gabrosky J. Crowie P. 2013, Establishing maximum size expectations for urban trees with regards to designed space, Arboriculture & Urban Forestry , 39(2): 68-73

Santamouris M., Synnefa A., Karlessi T. 2011 Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal confort conditions Solar Energy

Sañudo-Fontaneda LA, Charlesworth S., Castro-Fresno D., Andrés-Valeri V.C.A., Rodríguez-Hernández J. 2013 Experimental pervious pavement parking areas in the North of Spain Novatech 2013

Schlüter W., Jefferies C. 2001 Modelling the outflow from a porous pavement Urban Water

Scholz, M. Grabowiecki P. 2007 Review of Permeable Pavement Systems, Building and Environment 42 3830-3836

Smiley T. 2008, Comparison of methods to reduce sidewalk damage from tree roots, Arboriculture & Urban Forestry, 34(3): 179-183

Tyner, J., Wright, W., and Dobbs, P. (2009). Increasing exfiltration from pervious concrete and temperature monitoring. Journal of Environmental Management , 1-6.

Sobrino M. Por los Suelos_ El Perdido Arte del Empedrado Cómo se hace

Sobrino M. Aislarse o Integrarse_ Algunas notas sobre Patrimonio y Medio Ambiente Cómo se hace

Starke P., Göbel P., Coldewey W.G., 2010 Urban evaporation rates for water-permeable pavements. Water, Science and Technology

Starke P., Göbel P., Coldewey W.G., 2011 Effects on evaporation rates from different water-permeable pavement designs Water, Science and Technology

Takebayashi H, Moriyama M., 2008 Study on the urban heat island mitigation effect achieved by converting to grass-covered parking, Solar Energy

Terrén, 2000 Criterios para reducir el impacto ambiental asociado a la Urbanización, 2000, Boletín CF-S >14

Tumini, I. 2008 El microclima urbano en los espacios abiertos. Estudio de casos en Madrid. Tesis doctoral . ETSAM,

Ow Lai Fern, Ghosh S.2017 Growth of street trees in urban ecosystems: structural cells and structural soil, Journal of Urban Ecology 1-7

Pitt, R.; Chen S.; Clark S. Compacted Urban Soils Effects on Infiltration and Bioretention Stormwater Control Designs DOI: 10.1061/40644(2002)14

Rahardjo, H.; Indrawan, I.G.B.; Leong, E.C;. Yong, W.K. 2008 Effects of coarse-grained material on hydraulic properties and shear strength of top soil, Engineering Geology 101(3):165-173

Vegas F, Mileto C., Soriano L., Tomás S. 2015 Proyecto para la Restauración del Pavimento y portal de acceso a la plaza de Tronchón (Teruel). ARCHÉ. Publicación del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la UPV - Núms. 8, 9 y 10 – 2013, 2014 y 2015 309-317

Volder, A., Watson, W.T. and Viswanathan, B. 2009. Potential use of pervious concrete for maintaining existing mature trees during and after urban development. Urban For. Urban Green. 8:249-256

Wanphen S., Nagano K., 2009 Experimental study of the performance of porous materials to moderate the roof surface temperature by its evaporative effect Building and Environment

Yang, J-L; Zhang, G-L 2011 Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff, Journal of Soils and Sediments, Volume 11, Issue 5, pp 751–761

Capítulo de libro y libros completos

Ferguson, B.K.. 2005; Porous Pavements, Integrative Studies in Water Management and Land Development, Taylor and Francis

F**orman R. T.T., 2014**, Urban Ecology, Science of Cities, Cambridge University Press, New York, 91-119

Gehl, Jan, 2010: Cities for people, Island Press

Lopera,A. 1986 -Tratamiento superficial de los espacios exteriores - Introducción al diseño urbano- Ministerio de Obras Públicas- Instituto de Territorio y de Urbanismo,

Lopera, A. 2006 Análisis y diagnóstico de los materiales constructivos en la urbanización de calzadas y pavimentos del centro de Madrid, Jornadas Técnicas Municipales - El paisaje el Centro Histórico [coordinación, Antonio Díaz], Ayuntamiento de Madrid

Meuser, H. 2010 Contaminated Urban Soils, Environmental pollution, Springer, Germany

Rodriguez-Rojas, MI, 2017 Guía para la Integración de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en el Proyecto Urbano Editorial de la Univ. De Granada

Vegas F, Mileto C. 2017 Aprendiendo a

Restaurar Un manual de restauración de la arquitectura tradicional de la Comunitat Valenciana. Generalitat Valenciana.

Wessolek, G. 2005 Sealing of soils. In: Marzluff, J.M., Schulenberg, E., Endlicher, W. (eds) Urban Ecology- an international perspective on the interaction between human and nature. Springer. New York (2005)

Instituciones

AGU Arbeitsgemeinschaft Umweltplanung, 1988: Fortschreibung und Übernahme der Versiegelungskarte des Umwelatlas in das Räumliche Bezugssystem des ökologischen Planungsinstruments Berlin

Banco Mundial, Urban Population, https://goo.gl/6qvuV4

Boston Complete Streets, http://bostoncompletestreets.org/

Comisión Europea, Guidelines on best practice to limit, mitigate or compensate soil sealing, http://ec.europa.eu/environment/soil/sealing_guidelines.htm

Day, S.D. and Dickinson, S.B. (EDS.) 2008. Managing Stormwater for Urban Sustainability Using Trees and Structural Soils. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA

MAEP-AM 2016, Manual de Accesibilidad para espacios públicos urbanizados del Ayuntamiento de Madrid.

Curvas de intensidad-duración-frecuencia, 2003; Dirección General del Instituto nacional de meteorología, Secretaría general técnica, Ministerio de Medio Ambiente

Orden VIV 561/2010, BOE de febrero, por la que se desarrolla el documento técnico de condiciones básicas de accesibilidad y no discriminación para el acceso y utilización de los espacios públicos urbanizados

Ordenanza de Gestión y Uso Eficiente del Agua en la Ciudad de Madrid, 2006 Ayuntamiento de Madrid, BO. Ayuntamiento de Madrid 22/06/2006 num. 5709 pag. 2410-2443

Conferencia

Watson G., 2011 Fifteen years of urban tree planting and establishment research, Par-allel sesion 1a: Tree planting and establishment, Conference: Trees, People and the Built Environment At: Birmingham
Johnson T. 2009 Trees and permeable paving: future symbionts; City Of Mitcham & University Of South Australia https://treenet.org/resources/trees-and-permeable-paving-future-symbionts/

Webs/ Revistas on-line

Scientific American, 2012 Storm Scents: It's True, You Can Smell Oncoming Summer Rain, https://www.scientificamerican.com/article/storm-scents-smell-rain/

Generador de precios
http://www.generadordeprecios.info/

Proyecto Belles du bitume
https://www.frederique-soulard-contes.com/belles-de-bitume

Créditos imágenes o fotografías

Ilustraciones_Todas las ilustraciones han sido realizadas por María Nuñez | Licencia CC BY-NC-SA

Fotografías o figuras_Todas las fotografías o figuras que no tienen una fuente especificada en el pié de foto son propiedad de María Nuñez | Licencia CC BY-NC-SA excepto las figuras PP-1, PP-2, PP-3, PP-4, PP-7, PP-8 y PT-9.

Contacto: mnunezrguez(at)gmail.com

Agradecimientos

Al Ayuntamiento de Madrid, -Departamento de Intervención en el Paisaje Urbano- por haber promovido y financiado esta investigación. Muy en particular a Paloma Ramos Riesco y a Federico Manzarbeitia Arambarri por su trabajo como coordinadores del proyecto.

A Saturnino de Alba Alonso -PDI del departamiento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid por sus enseñanzas y comentarios.

Al Ayuntamiento de Berlín, en particular a Manfred Goedecke y todos los expertos estrevistados por sus comentarios valiosos para elaborar este documento: Antonio Lopera, Jose Manuel Pazos, Gabriel Ruiz Cabrero, Javier Neila, Christian Ysenbaardt, Marta Nieto, Jose Luís Sanz Guerrero Strachan, Luis Tejero Encinas, Sara Perales, Adam Kierkowski, Steffen Koch.

A Anja Thomsen por su ayuda en la traducción de textos en alemán.

A los autores que han cedido fotografías para ilustrar este trabajo, y que en algunos casos, incluso las han realizado ad hoc.