

HORMIGÓN BIORECEPTIVO

EL RESIDUO DEL CAFÉ COMO PROPUESTA ORGÁNICA



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA



TRABAJO FIN DE GRADO

Sofía Hortelano Márquez

HORMIGÓN BIORECEPTIVO
El residuo del café como propuesta orgánica

HORMIGÓN BIORECEPTIVO
EL RESIDUO DE CAFÉ COMO PROPUESTA ORGÁNICA

Estudiante

Sofía Hortelano Márquez

Expediente 20202

Tutor

Hugo Varela Recio

Departamento de Construcción y Tecnologías Arquitectónicas

Aula TFG 2

Andrea Alonso Ramos, *coordinadora*

M.^a Ángeles Benito Pradillo, *adjunta*

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Universidad Politécnica de Madrid

ÍNDICE

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN

- 1.1. MOTIVACIÓN
- 1.2. METODOLOGÍA
- 1.3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

2. MARCO TEÓRICO

- 2.1. CONCEPTO DE BIORECEPTIVIDAD
- 2.2. ESTADO DEL ARTE
 - 2.2.1. CEMENTO DE FOSFATO DE MAGNESIO (MPC)
 - 2.2.2. OTROS COMPONENTES POTENCIADORES DE LA BIORECEPTIVIDAD
- 2.3. PROPIEDADES INTRÍNSECAS DEL HORMIGÓN BIORECEPTIVO
 - 2.3.1. REDUCCIÓN DEL pH
 - 2.3.2. POROSIDAD, RUGOSIDAD, CAPILARIDAD POR ABSORCIÓN Y PERMEABILIDAD
- 2.4. BENEFICIOS Y LIMITACIONES FRENTE A SISTEMAS INDUSTRIALIZADOS
 - 2.4.1. URBANOS-AMBIENTALES
 - 2.4.2. ENERGÉTICOS-ECONÓMICOS
 - 2.4.3. LIMITACIONES

3. COMPATIBILIDAD BIOLÓGICA

- 3.1. AGENTES COLONIZADORES
 - 3.1.1. PLANTAS VASCULARES
 - 3.1.2. MUSGOS
 - 3.1.3. LÍQUENES
- 3.2. PROPIEDADES EXTRÍNSECAS DEL HORMIGÓN BIORECEPTIVO
 - 3.2.1. CLIMA
 - 3.2.2. ORIENTACIÓN Y ARQUITECTURA

4. PROPUESTA CON RESIDUO DE CAFÉ

- 4.1. INTRODUCCIÓN
- 4.2. MATERIAL DE ESTUDIO
- 4.3. ENSAYOS DE LABORATORIO
 - 4.3.1. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN
 - 4.3.2. ENSAYOS COMPATIBILIDAD BIOLÓGICA
- 4.4. RESULTADOS

5. CONCLUSIONES

- 5.1. GENERALES - ESTADO DEL ARTE
- 5.2. ESPECÍFICAS - ENSAYOS DE LABORATORIO
- 5.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

BIBLIOGRAFÍA

RESUMEN

La **fusión entre el hormigón y la naturaleza** comienza en un período mínimo de cuarenta años, el necesario para que organismos como el musgo comiencen a apropiarse del material, pero ¿cómo se podría adelantar este proceso para que la arquitectura y la vegetación se unan desde el principio? El estudio busca el desarrollo de un hormigón bioreceptivo que acelere dicha fusión, siendo así un material más amable con el entorno y la vegetación.

Para permitir la colonización biológica del material es necesario dotarlo de determinadas **propiedades físicas** relacionadas con su micro y macroestructura, y **propiedades químicas** referentes a la reducción de la alcalinidad del hormigón, para permitir el desarrollo de organismos vivos. Por otro lado, la implementación de bioreceptividad en la envolvente arquitectónica proporciona **beneficios urbanos, ambientales, energéticos y económicos**

En esta investigación se valora la utilización de **componentes orgánicos naturales frente a químicos**, por ello, en este caso el protagonista será el residuo de café. Para ello, se ha llevado a cabo un estudio **científico-experimental** contrastando diversos métodos desarrollados en artículos científicos, desarrollando muestras de un hormigón bioreceptivo y ensayándolas en laboratorio para su caracterización.

PALABRAS CLAVE

Bioreceptividad · Residuo de café · Sostenibilidad · Botánica · Estudio experimental · Fachada vegetal

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

En primavera de 2024, en el Taller Experimental II “HORMIGÓN CONCRETO” se propuso el reto de construir mobiliario urbano con hormigón, en este caso, un banco que actualmente se ubica en la “*Rosaleda*” de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (ETSAM). En ese momento, me surgió la inquietud sobre que este mobiliario fuese **lo más compatible posible con el entorno**, y por consiguiente, la necesidad de modificar el hormigón como se conoce hoy en día. Comenzó así mi investigación sobre un **hormigón bioreceptivo basándose en la reducción del pH** alcalino del hormigón común, a través de **residuo de café, un material accesible, abundante y orgánico**. Me parece imprescindible agradecer a “Cátedra Blanca” por la oportunidad de publicar un artículo con los primeros acercamientos a este material en su 5ª edición de la revista “EN HORMIGÓN” (Hortelano, 2025), y la animación para continuar dicho estudio en el Trabajo Fin de Grado por parte de profesores del taller como Álvaro Moreno, David Sanz y Ana Isabel Santolaria.



Figura 1.1. Fotografías propias. Banco de Hormigón bioreceptivo, Taller Experimental II Hormigón Concreto 2024. ETSAM, mayo 2024

Por otro lado, el tema propuesto enlaza **arquitectura con botánica**, una de mis aficiones personales y de la que partió la introducción de café, debido a su capacidad de reducir el pH del sustrato para las plantas y, por lo tanto, la posibilidad de que ocurra en el hormigón. Además, este estudio me permite investigar sobre qué plantas podrían ser compatibles y en qué situación, **aplicando conocimientos previos** sobre sus cuidados y necesidades del día a día, **y ampliarlos** al introducir nuevos organismos como musgos, líquenes u otros microorganismos.

1.2. Metodología

El desarrollo del estudio se propone a través de una **metodología teórico-experimental**. Esta comienza con un **estudio teórico** que comprende la evaluación y análisis de estudios previos, beneficios y limitaciones del hormigón bioreceptivo y las propiedades intrínsecas y extrínsecas necesarias para la bioreceptividad; posteriormente un **estudio experimental en laboratorio**, que define las características del material a desarrollar, junto a los ensayos en laboratorio necesarios para su completa definición.



Figura 1.2. Fotografía propia. Preparación de muestras para análisis. Madrid, febrero 2024



Figura 1.3. Fotografía propia. Preparación de muestras para ensayos. ETSAM, octubre 2025

1.3. Objetivos del estudio

A partir de la metodología propuesta, se concretan los **objetivos generales** enfocados principalmente en el estudio teórico mencionado, que son los siguientes:

1. Realizar un estado del arte sobre las investigaciones existentes del hormigón bioreceptivo.

Comenzando con la Tesis doctoral de Sandra Manso Blanco, *Bioreceptivity optimisation of concrete substratum to stimulate biological colonisation* (S. Manso, 2014), que se centra en el cemento de fosfato de magnesio (MPC), y continuando con diversos artículos científicos que proponen otras alternativas, analizan las ventajas e inconvenientes de la bioreceptividad y comparan con los sistemas constructivos industrializados.

2. Analizar las propiedades intrínsecas y extrínsecas del material.

En primer lugar, se estudiarán las propiedades intrínsecas como la porosidad, rugosidad, capilaridad, permeabilidad y principalmente la reducción del pH; bien es cierto que estas comparten una relación directa con el material, sin embargo, no se pueden obviar las propiedades extrínsecas que afectarán a la compatibilidad biológica, tales como el clima, la orientación o la propia morfología de los elementos arquitectónicos.

3. Estudiar los agentes colonizadores de este material (plantas, musgos y líquenes).

Destacando las necesidades básicas para poder sobrevivir y desarrollarse en el hormigón bioreceptivo, y complementándolo con el aspecto físico y su alteración según la estación del año (especies caducifolias o perennes)

También se proponen una serie de **objetivos específicos** relacionados con la metodología experimental en laboratorio:

1. Definir un hormigón bioreceptivo con residuo de café.

Proporcionando una dosificación del nuevo material con las características fisicoquímicas que permiten la bioreceptividad.

2. Evaluar el material con ensayos de laboratorio

Entre los que se incluyen ensayos de caracterización del material, que comprenden las propiedades intrínsecas mencionadas anteriormente; y ensayos de compatibilidad y colonización biológica, centrándose en el desarrollo de semillas en la superficie del material, la adhesión de musgo en las muestras, y la propia supervivencia de organismos.

3. Realizar la comparación de los resultados obtenidos en laboratorio

De las distintas muestras ensayadas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Concepto de bioreceptividad

Guillitte (1995) definió el concepto de **“bioreceptividad”** como **“la habilidad de un material (o cualquier objeto inerte) para ser colonizado** por uno o varios grupos de organismos vivos sin necesariamente sufrir ningún biodeterioro” (p. 215). Este concepto no era desconocido ni novedoso, en cambio, la forma en la que se manifestaba coincidía con términos como la “biodegradación” o “biodeterioro” (Hueck, 1965), enfocados exclusivamente al daño que esto podía producir en las edificaciones o patrimonio. Por esta razón, fue crucial la nueva denominación propuesta por Guillitte, que a su vez defendía que la **percepción de agentes colonizadores en las edificaciones dependía del observador**, ya que propiedades como el cambio de color en las fachadas podían ser estéticamente atractivas para algunas personas, además de sus propiedades de purificación del aire entre otros beneficios ambientales.

En cuanto a la terminología, Guillitte (1995) comienza introduciendo el término francés *“réceptivité”* en el ámbito de la medicina y veterinaria, definiéndose por Toma et al. (1991) como “la aptitud de un organismo para albergar un patógeno, para permitir su desarrollo o multiplicación, sin necesariamente sufrir” (p. 216). Sin embargo, finalmente optó por el término “bioreceptividad” debido a su traducción directa en francés, alemán, holandés, inglés, italiano y portugués. Además, Guillitte (1995) menciona que la definición de “receptividad” comparte similitudes con el concepto de estudio, siendo esta “la capacidad del estigma de una flor de ser fertilizado por los granos de polen a través del tubo polínico” (p. 216).

Por otro lado, Guillitte (1995) también expresaba el concepto de “bioreceptividad” como “la totalidad de las propiedades materiales que contribuyen al establecimiento, anclaje y desarrollo de la fauna y/o flora” (p. 216). Concretamente, hace referencia a las **propiedades necesarias** en materiales pétreos, como puede ser el hormigón, siendo estas el **área expuesta al clima, rugosidad, porosidad, humedad, capilaridad por absorción y la composición química de la capa superficial**. En cuanto a esta última, puede hacer referencia a la incompatibilidad biológica de los materiales de construcción, ya que en ese momento se conocía la influencia del pH sobre el contenido taxonómico de los organismos colonizadores, los cuales necesitan un pH entre neutro y ácido. Para complementar el estudio teórico, desarrolló junto a Roland J. M. Dreesen ensayos de laboratorio con rocas naturales, ladrillo, mortero y hormigón celular, en el que este último presentaba propiedades compatibles con la bioreceptividad debido a su alta porosidad y la presencia de cemento fácilmente soluble en ácidos orgánicos. (Guillitte & Dreesen, 1995).

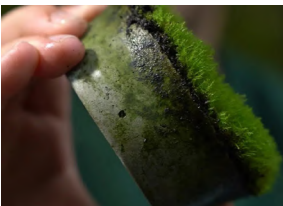


Figura 2.1. Hormigón bioreceptivo «Respyre». (Kraljenich, 2023)

En el estudio de Sanmartín et al. (2021), se realiza una revisión del concepto de bioreceptividad desde Olivier Guillitte (1995) hasta el 25 aniversario de este término, en 2020. Al igual que Guillitte, se expresan los **beneficios de la bioreceptividad**, contrastándolos con estudios más recientes que muestran el carácter “bioprotector” de algas (Cutler et al., 2013) y cianobacterias (Ramírez et al., 2010) o la capacidad de absorción de CO₂ de algunas especies de algas. Un concepto determinante para el cambio de paradigma en cuanto a la colonización de organismos en las edificaciones es la “**bioprotección**” (Carter & Viles, 2005), que indica la capacidad de dichos organismos para proteger a los materiales de construcción de la meteorización y erosión.

Tras la revisión de la investigación, se reducen de seis tipos de “bioreceptividad” propuestos por Guillitte (1995): primaria, secundaria, terciaria, intrínseca, extrínseca y semiextrínseca; a cuatro. Comenzando por la primaria que necesita especies de crecimiento rápido y disperso; en la secundaria estas especies se sustituyen por otras más competitivas; en la terciaria, tras la limpieza, se desarrolla la recolonización de forma más rápida; y finalmente en la **cuaternaria se acelera a través de los aditivos**.

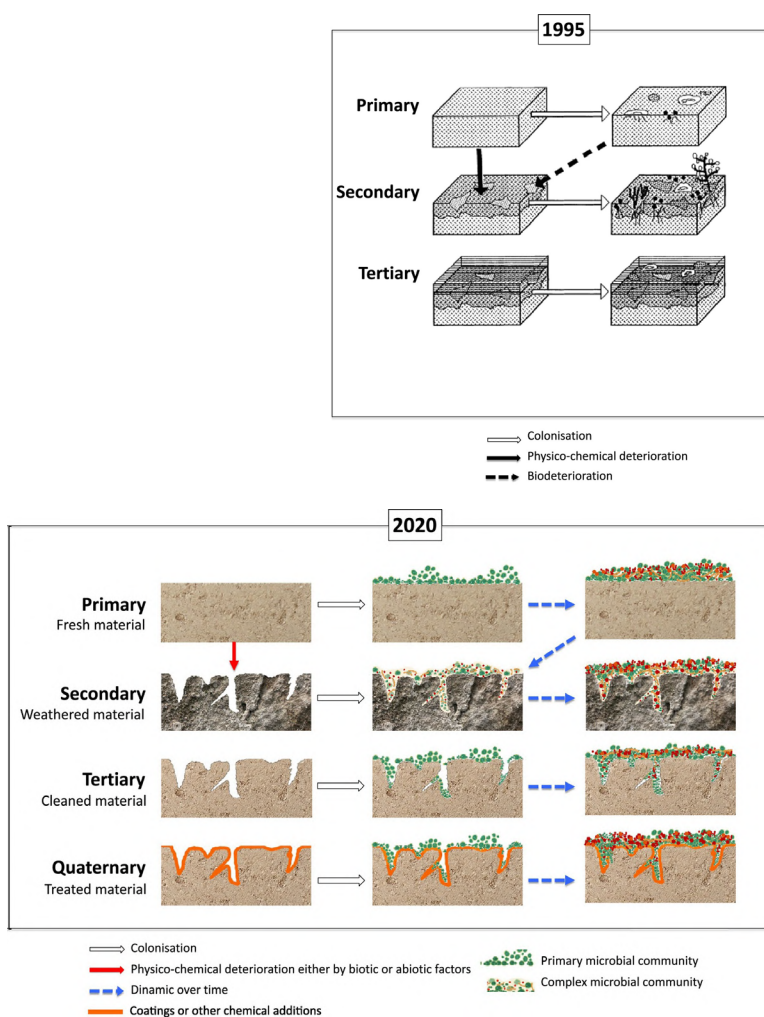


Figura 2.2. Esquema comparativo entre los tipos de bioreceptividad de O. Guillitte y la propuesta del estudio (Sanmartín et al., 2021)

2.2. Estado del arte

A continuación, se estudian los diversos componentes capaces de mejorar la bioreceptividad en materiales cementicios, siendo el fosfato de magnesio una de las vías principales en la actualidad, aunque no la única.

2.2.1. CEMENTO DE FOSFATO DE MAGNESIO (MPC)

El cemento de fosfato de magnesio (MPC - Magnesium Phosphate Cement) ha sido objeto de investigación por diversos estudios, destacando la ya mencionada Tesis doctoral de Manso Blanco (2014). Este tipo de **cemento destaca por su baja alcalinidad** ($\text{pH} \approx 7$), lo que permite la bioreceptividad desde fases muy tempranas y contrasta con la alcalinidad ($\text{pH} \approx 13$) del cemento Portland (OPC). Esta característica permite prescindir de carbonatación previa o adición de ácidos.

La microestructura del MPC es también determinante en este ámbito, debido a que en el proceso de hidratación¹ se forma estruvita ($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) produciendo una matriz con **poros interconectados capaces de retener humedad, que repercute positivamente en la bioreceptividad**. En cuanto a la porosidad y rugosidad, Manso menciona su relación con la bioreceptividad desde el comienzo del estudio, contrastando con los resultados de los 23 morteros de diferente porosidad (desde 2% hasta 18%), los resultados concluyen que las muestras de MPC tuvieron mayor bioreceptividad para el alga *Chlorella vulgaris*, dentro de este tipo de cemento, y la probeta que mostró mejores resultados fue la Ma28-1C², a pesar de tener la menor porosidad y rugosidad. Bien es cierto, que menciona que la muestra MA15-0.5C, podrá tener **mejores resultados a lo largo del tiempo** (S. Manso, 2014). Por otra parte, los resultados teóricos de la tesis se corroboraron con los ensayos posteriores de (S. Manso et al., 2015).

1. Proceso químico en el que el agua se combina con sustancias anhídras del cemento que la absorben generando un proceso de cristalización que desprende calor, denominado fraguado.

2. Tipo de cemento (P: OPC; M: MPC), tamaño árido (α : 0/2 mm; A: 2/4 mm), agua/cemento (e.g.: 20 es 0.2 y 60 es 0.6), contenido de pasta de cemento (factor que multiplica la cantidad mínima de pasta de cemento necesaria para unir todas las partículas de árido, C, según Klein et al. (2012)).

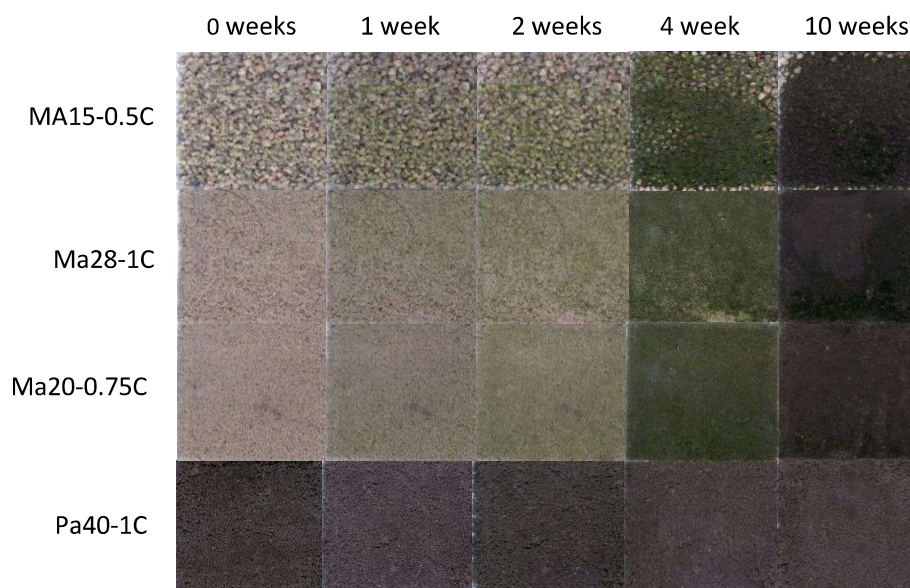


Figura 2.5. Evolución de la apariencia visual y diferencia en el color inicial entre las muestras de MPC y OPC. (S. Manso, 2014)

El estudio mencionado sirvió de base para siguientes investigaciones, como es el caso del Trabajo Fin de Máster de Fiamingo (2017). En este, se explica que el cemento de **fosfato de magnesio** consiste en la **reacción ácido-base entre el óxido de magnesio o magnesia (MgO) y fosfato de potasio monobásico KDP (KH_2PO_4)**, un fosfato soluble en agua. La variabilidad de resultados de las muestras depende de la relación Magnesio/Fósforo (Mg/P) y tuvieron por conclusión que los cementos con mayor bioreceptividad son a base de magnesia y con una mayor cantidad de KDP, para disminuir el pH y mejorar las propiedades mecánicas. Se vuelve a mencionar la **importancia de la baja alcalinidad de las muestras, y la necesidad de rugosidad superficial** para la adhesión de algas y musgos. (Fiamingo, 2017)

En investigaciones más recientes, se aplica este tipo de cemento en paneles de fachada bioreceptivos debido a las características mencionadas con anterioridad, como la **baja alcalinidad, la retención de humedad superficial por la porosidad, y la rugosidad**, lo que se ve incrementado por el “*foaming agent*” ($NaHCO_3$) en el caso del estudio de Lee et al. (2025).

En conclusión, el MPC parece a priori una de las opciones más favorables para la colonización biológica de forma natural, como alternativa a sistemas de vegetación vertical (VGS) y cubiertas verdes industrializadas. Sin embargo, existen limitaciones como que algunos morteros de fosfato de magnesio contienen aditivos parcialmente inhibidores de la colonización, y que **la alta porosidad puede comprometer la resistencia mecánica o durabilidad** (S. Manso, 2014). Además, cabe destacar que esta alternativa supone **procesos plenamente químicos** que llevan un impacto ambiental de huella de carbono complementario al propio proceso de fabricación de cemento. Por ello, se deberían **explorar alternativas más sostenibles**, justificando así la motivación de este Trabajo Fin de Grado, con la valorización de residuos orgánicos como el café.

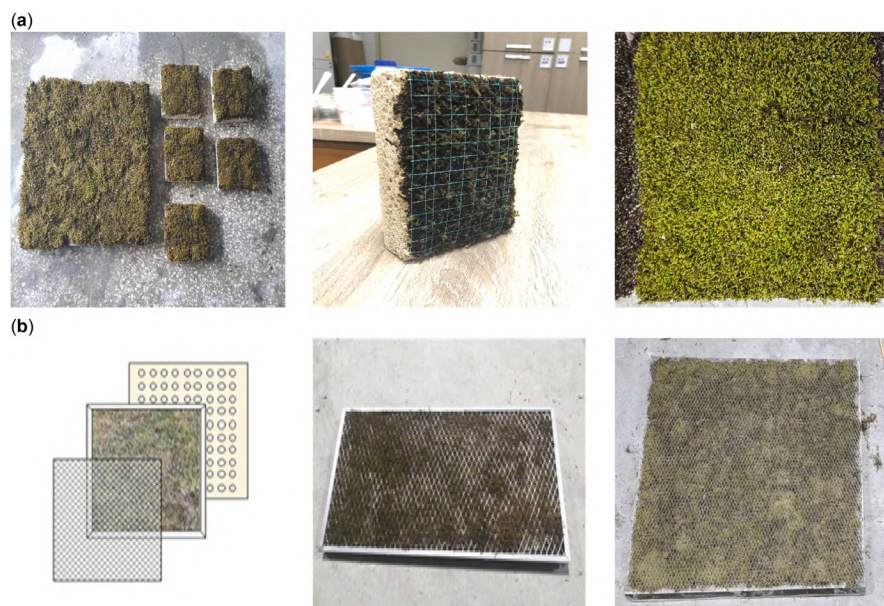


Figura 2.6. Hormigón bioreceptivo, aplicación para exterior (Lee et al., 2025)

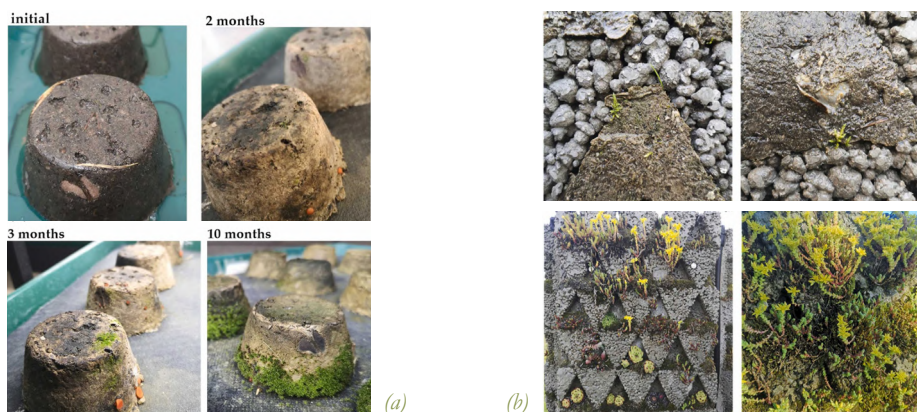
2.2.2. OTROS COMPONENTES POTENCIADORES DE LA BIORECEPTIVIDAD

Tras analizar las investigaciones realizadas con el MPC, se evalúan diferentes alternativas para mejorar la bioreceptividad del hormigón OPC (Cemento Portland). Se observa que cambiar el árido por **arcilla expandida (CEC)** mejora la bioreceptividad y las propiedades hidráulicas; añadir **cenizas de hueso³** proporciona nutrientes a los organismos biológicos; usar **retardador de fraguado en la superficie** elimina la capa superficial hidrofóbica y por tanto aumenta la bioreceptividad; y se menciona que **modificar la relación agua/cemento no presenta cambios** en cuanto a bioreceptividad. La **capacidad resistente y durabilidad de este tipo de materiales es menor** que el hormigón común, pero esto solo toma importancia al usarlo como material estructural. Se compararon los resultados del hormigón MPC y el OPC con los cambios propuestos, este último tuvo mayor crecimiento biológico y la cobertura máxima fue de un 43,17% en la muestra 3-2 Reg-BA-HW-R⁴. Otras muestras que contenían CEC y LW, también presentaron resultados favorables (Veeger et al., 2021).

Por otra parte, los **cementos ácido-base** destacan por su baja alcalinidad y biocompatibilidad, destacando el cemento de fosfato de zinc, de policarboxilato y de ionómeros de vidrio. (Fiamingo, 2017)

En otro estudio, se realizaron pruebas con hormigón C25, otro con bajo pH por tener **clinker sulfoaluminato**, y hormigón UHPC⁵ con **sílice**. Las conclusiones son similares a otras investigaciones, el pH alto no permite el desarrollo de las plantas (>8), es necesario controlar la cantidad de materia orgánica que se introduce y se propone analizar el impacto de producción del hormigón bioreceptivo. (Lewandowski et al., 2023).

Otra estrategia que se ha publicado en la literatura, son los sistemas multicapa con hormigón bioreceptivo y la **introducción de sustrato (bio-booster)** en estos (Figuras 2.7.), el cual mejoró el desarrollo de las plantas en el material (Jakubovskis et al., 2023). El **residuo de café puede tener un comportamiento similar**, al tratarse de materia orgánica natural, además de otros factores que se analizarán posteriormente (Apartado 4.1.).



3. Material orgánico elaborado a partir de huesos de ganado calcinados.

4. Reg = árido común / CEC = arcilla expandida, BA = ceniza de hueso, HW = mucho contenido de agua / LW = bajo contenido de agua, R = retardante.

5. Hormigón de muy alto rendimiento

Figuras 2.7.
(a) Bio-booster
(b) Hormigón bioreceptivo con sustrato (bio-booster).
(Jakubovskis et al., 2023)

2.3. Propiedades intrínsecas del hormigón bioreceptivo

2.3.1. REDUCCIÓN DEL pH

La colonización biológica puede ocurrir únicamente al reducir el pH de 12-13 (OPC) a 9-10, gracias a la carbonatación⁶ (S. Manso et al., 2015) que mejora la capacidad bioreceptiva del material (Stohl et al., 2023).

Manso Blanco (2014) corrobora que las muestras con menor pH desarrollan biofilms⁷ más rápidos y homogéneos, lo cual Sanmartín et al. (2021) refuerza indicando que la **alcalinidad condiciona principalmente la bioreceptividad primaria** (Guillitte, 1995), siendo incompatible con la colonización de la mayoría de las algas verdes o cianobacterias. Esto, también se menciona en el trabajo de Fiamingo (2017), añadiendo que el cemento Portland, las cenizas volantes y retardantes como el bórax o el ácido bórico (H_3BO_3) aumentan el pH de las muestras, repercutiendo negativamente a la bioreceptividad. Por otra parte, explica que el nitrato de zinc ($Zn(NO_3)_2$) no modifica el pH al final del fraguado, pero retrasa el proceso de aumentarlo en el tiempo.

6. Proceso natural en el que el dióxido de carbono (CO_2) del aire reacciona con el hidróxido de calcio, formando carbonato de calcio y disminuyendo su pH (alcalinidad)

7. Ecosistemas microbianos complejos que incluyen microorganismos como bacterias, hongos, algas y cianobacterias.

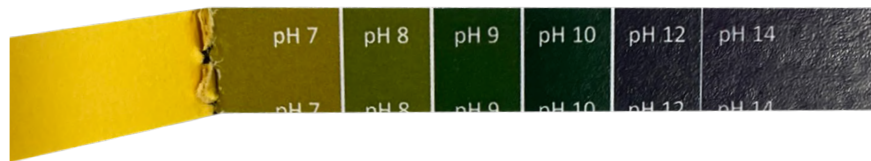


Figura 2.8. Fotografía propia. Tiras medidoras del pH, octubre 2025

En comparación, Veeger et al. (2021) indican que no parece necesario reducir el pH por debajo de 10 (Figura 2.9.), ya que las muestras que tenían este pH o incluso superior mostraron crecimiento biológico. Por consecuencia, **existen otros factores que pueden compensar la alcalinidad**, como es la porosidad y rugosidad, la retención hídrica o la microestructura del propio material, analizado por Lewandowski et al. (2023). En cambio, este último vuelve a mencionar que el pH es uno de los factores más determinantes para la supervivencia de plantas.

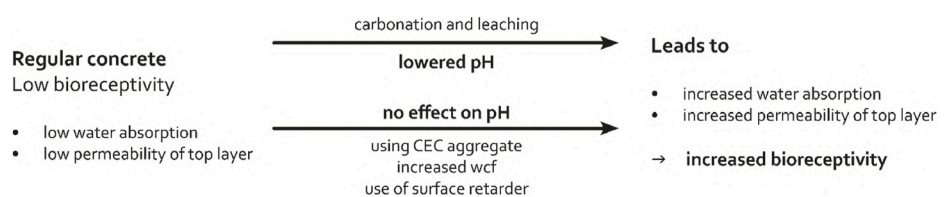


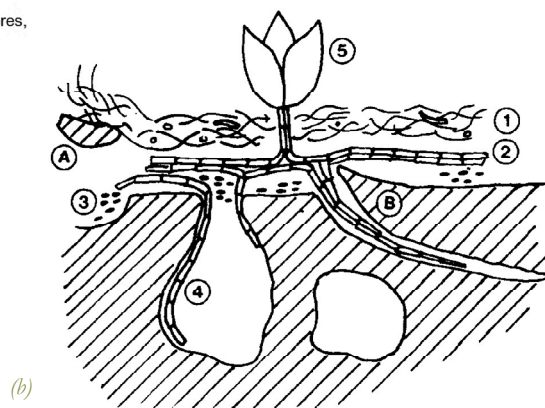
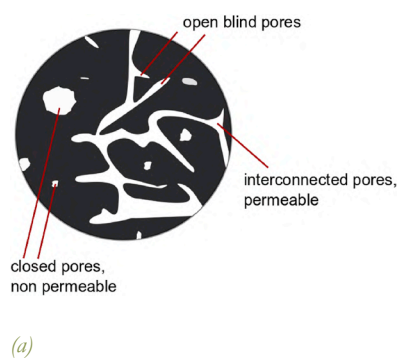
Figura 2.9. Efectos de la carbonatación en el pH. (Veeger et al., 2021)

2.3.2. POROSIDAD, RUGOSIDAD, CAPILARIDAD POR ABSORCIÓN Y PERMEABILIDAD

Fiamingo (2017) destaca que la rugosidad favorece la adhesión del biofilm, lo mismo que menciona el estudio de Cutler et al. (2013) sobre colonización en materiales pétreos naturales (equivalente a la microestructura del hormigón), en el que **las algas verdes tienden a colonizar superficies rugosas con microporos**. Por otra parte, se analizó el desarrollo de cianobacterias en monumentos de piedra, concluyendo que su penetración y el espesor del biofilm se ve influenciado por la rugosidad y la retención de humedad (Ramírez et al., 2010).

En el estudio de Sandra Manso et al. (2015), los resultados de laboratorio no mostraban que la **alta porosidad y rugosidad** pudiesen repercutir positivamente en los resultados, ya que se apreció que en las muestras con áridos de mayor tamaño el resultado era menos homogéneo. Pero si menciona otros factores físicos que condicionan el desarrollo de microorganismos, como podían ser la higroscopicidad⁸, color del material y el albedo⁹, entre otros. (S. Manso et al., 2014)

En el desarrollo de paneles de fachada bioreceptivos, se indica que **cuanto más poroso es el material mejor retiene la humedad por capilaridad** y la libera lentamente, además de que la **rugosidad facilita la adherencia** (Figura 2.10.b) de grupos de especies como el musgo (Lee et al., 2025). La importancia de la **capilaridad** mencionada se ve reforzada en el estudio de Lewandowski et al. (2023), que señala que la capacidad de absorción de agua del material es incluso más determinante que la composición química y el pH, lo que confirma también Veeger et al. (2021).



8. f. Fís. Propiedad de algunas sustancias de absorber y exhalar la humedad según el medio en que se encuentran.

9. m. Fís. Proporción existente entre la energía luminosa que incide en una superficie y la que se refleja.

Figuras 2.10.

(a) Porosidad abierta y cerrada (Stobl et al., 2023)

(b) Colonización biológica en material poroso (Guillitte & Dreesen, 1995)

1. Biofilm de cianobacterias y algas verdes

2. Protonema de musgo (filamentos primera etapa)

3. Diatomeas (alga)

4. Rizoides del musgo

5. Primordio musgo (estructura)

A. Biodeterioro por cizallamiento

B. Biodeterioro por rizoides

Como conclusión, **la rugosidad mejora el anclaje de microorganismos** y la adhesión de nutrientes; **la estructura porosa y permeable puede controlar el drenaje** del agua líquida y la transferencia de vapor, mejorando la durabilidad del biofilm; y por **capilaridad se retiene agua para nutrir** a los microorganismos. (Stohl et al., 2023)

2.4. Beneficios y desventajas frente a sistemas industrializados

2.4.1. URBANOS – AMBIENTALES

Se considera uno de los apartados más relevantes de este Trabajo Fin de Grado, los beneficios a escala urbana y ambiental que proporciona la implementación de sistemas con vegetación en las ciudades, englobando tanto sistemas industrializados como los beneficios añadidos por los sistemas bioreceptivos propuestos.

En primer lugar, se trata la cuestión de la reducción del **efecto de la isla de calor** (UHI – Urban Heat Island) (Figura 2.11.), reflejando en el estudio de M. Manso et al. (2021) que las cubiertas verdes (*green roof*) reducen entre 1°C y 2,3°C, y los muros verdes (*green walls*) en torno a 1,37°C la temperatura urbana. La incorporación urbana de fachadas (*green façade*) y muros verdes (*living walls*) puede mitigar el efecto de isla de calor urbano aproximadamente 5 °C en todas las zonas climáticas estudiadas, llegando a 8 °C en calles estrechas con urbanización densa y edificios de gran altura. (Susca et al., 2022). Algo absolutamente crucial en este momento de drástico aumento de temperaturas como consecuencia del cambio climático.

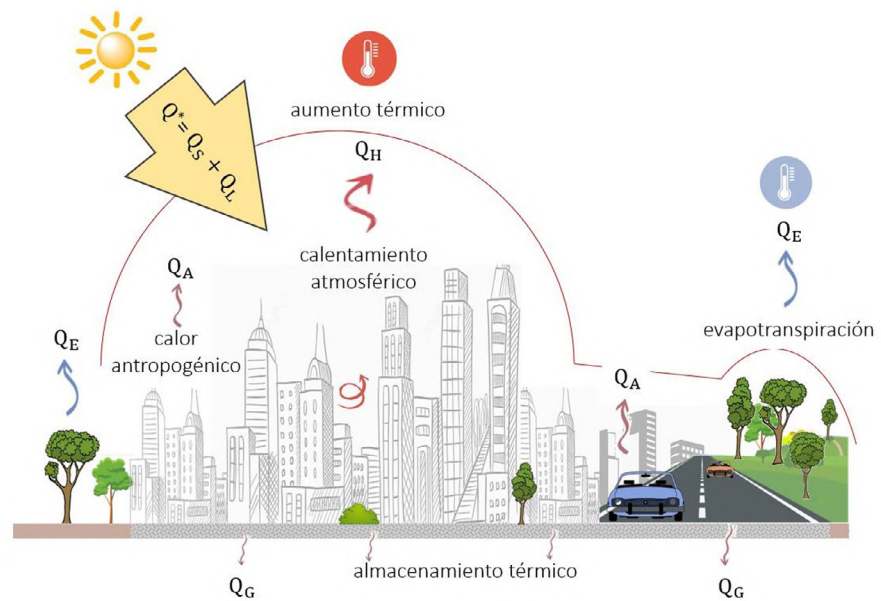
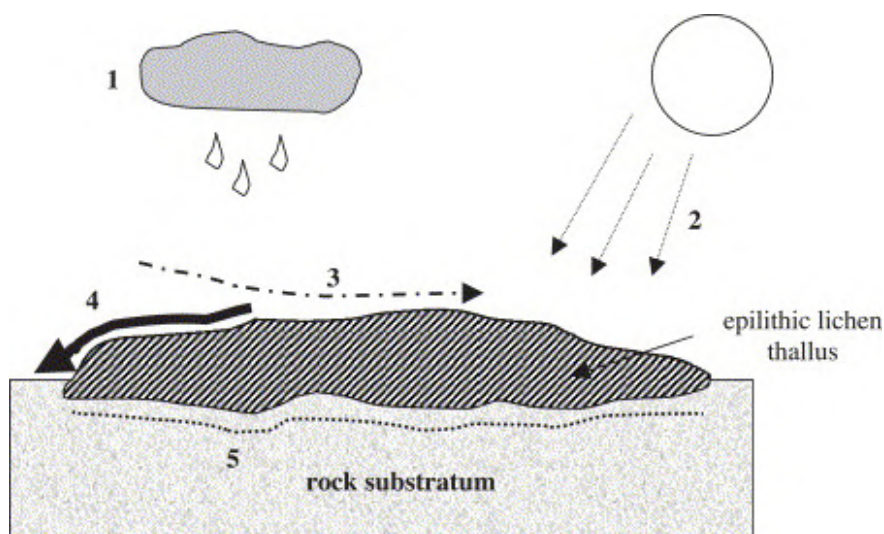


Figura 2.11. Intercambio de energía entre la Tierra y la atmósfera. (Garzón Barrero, 2023)

A **nivel acústico**, las cubiertas verdes pueden reducir hasta 10dB y los muros verdes (*green walls*) 5,5dB. (M. Manso et al., 2021), mejorando el de aislamiento acústico de la envolvente del edificio. Estas conclusiones se ven reforzadas por estudios como el de Veeger et al. (2025), en el que se evalúan los efectos de absorción acústica de los musgos en hormigones bioreceptivos, debido a la combinación entre la porosidad del material y la microestructura vegetal.

En términos de **gestión hídrica**, existe la capacidad de mejorar la gestión de aguas de la propia ciudad, disminuyendo la cantidad de polvo, contaminantes y nutrientes que se enviarían al sistema de alcantarillado. Por otro lado, son capaces de reducir un 71% la escorrentía, oscilando entre un mínimo de 49% y un máximo de 90% (M. Manso et al., 2021), lo que también se ve representado en el diagrama (Figura 2.12.) propuesto por Carter & Viles (2005), que explica la bioprotección de la piedra caliza por un líquen epilítico¹⁰, similar al biofilm que se puede formar en los hormigones bioreceptivos. Esto último, se refuerza en el artículo de Cutler et al. (2013) en el que se explica que las algas verdes tienen un **efecto bioprotector** en los materiales subyacentes ya que reducen la retención de calor.



10. Etimología griega:
epi- (epi) "sobre" / -lítico (lithikós)
"perteneciente o relativo a la piedra"

Figura 2.12. Modelo conceptual de la bioprotección de la piedra caliza por un líquen epilítico (Carter & Viles, 2005)

La **mejora de la calidad del aire** es uno de los factores fundamentales, las cubiertas verdes mostraron una reducción de un 37% el SO_2 , y los muros verdes (*green wall*) reducen NO_2 11,7% - 40%, PM_{10} 42% - 60%, O_3 40%, SO_2 3,5%, CO 1,34% y $\text{PM}_{2.5}$ 1,34%¹¹ (M. Manso et al., 2021). Por añadidura, el estudio reciente de Lee et al. (2025) registró la reducción de CO_2 y PM (partículas finas) en los paneles de fachada bioreceptivos analizados: en interiores oscila entre 30% - 40% y en exterior entre 1,6% - 17%.

11. NO_2 = dióxido de nitrógeno;
 O_3 = ozono; SO_2 = dióxido de azufre; CO = monóxido de carbono;
 PM = partículas en suspensión

Finalmente, la implementación de infraestructura verde aporta **beneficios sociales y de salud**, destacando el estudio en el ámbito de la medicina de Marselle et al. (2021), en el que muestra el **impacto positivo de la biodiversidad en las ciudades**. Los autores señalan que, además de los beneficios urbanos y ambientales mencionados, el uso de materiales bioreceptivos mejora la salud pública, reduce el estrés, incrementa el bienestar y aumenta la cohesión social de las personas que se relacionan con ella. Por otro lado, invitan a la fortificación de la **cooperación multidisciplinar entre los expertos en planificación urbana, biodiversidad, clima y salud**. Estos beneficios se alinean con los observados por Lewandowski et al. (2023).

2.4.2. ENERGÉTICOS – ECONÓMICOS

Los sistemas de integración vegetal en la arquitectura representan una estrategia pasiva para reducir las necesidades energéticas de los edificios, objetivo primordial en el concepto de sostenibilidad (social, económica y ambiental). Los beneficios energéticos muestran que principalmente las cubiertas verdes pueden aportar un **ahorro energético** de hasta un 84% en estaciones cálidas y 48% en estaciones frías, aunque esto depende del tipo de clima y del tipo de edificación. Por consecuencia, mejoran la **eficacia de los sistemas fotovoltaicos** debido a la reducción de cargas en el edificio, y a la reducción de la temperatura en los propios paneles al componer cubiertas verdes, mejorando su rendimiento. (M. Manso et al., 2021)

En el estudio de Coma et al. (2017), se realizan pruebas a escala real de dos tipos de sistemas de vegetación vertical (VGS), teniendo por resultados que la incorporación de vegetación **reduce la temperatura superficial** según la orientación, lo que conlleva a ahorros energéticos en refrigeración de entre 33,8% y 58,9%, según el tipo de sistema, y ahorros en calefacción de 4,2 %. Se destaca que existe relación directa entre la irradiación solar y el ahorro de energía, por cada kWh de irradiación, los dos sistemas analizados podrían producir un ahorro energético de entre 19,4% y 23,4%.

En relación con la escala urbana, la instalación de fachadas con vegetación **reduce la demanda energética**, mencionando en el propio estudio Coma et al. (2017), la importancia del comportamiento de los propios usuarios, ya que bajando el *setpoint*¹² de 24°C a 18°C, el ahorro energético se reduce alrededor del 30%¹³. Se destaca que las fachadas verdes (*green façade*) son más eficientes en invierno, con reducciones de demanda de calefacción de hasta de 30% dependiendo del clima, mientras que los muros verdes (*living wall*) funcionan mejor en verano, reduciendo la demanda de refrigeración hasta 51%. (Susca et al., 2022)

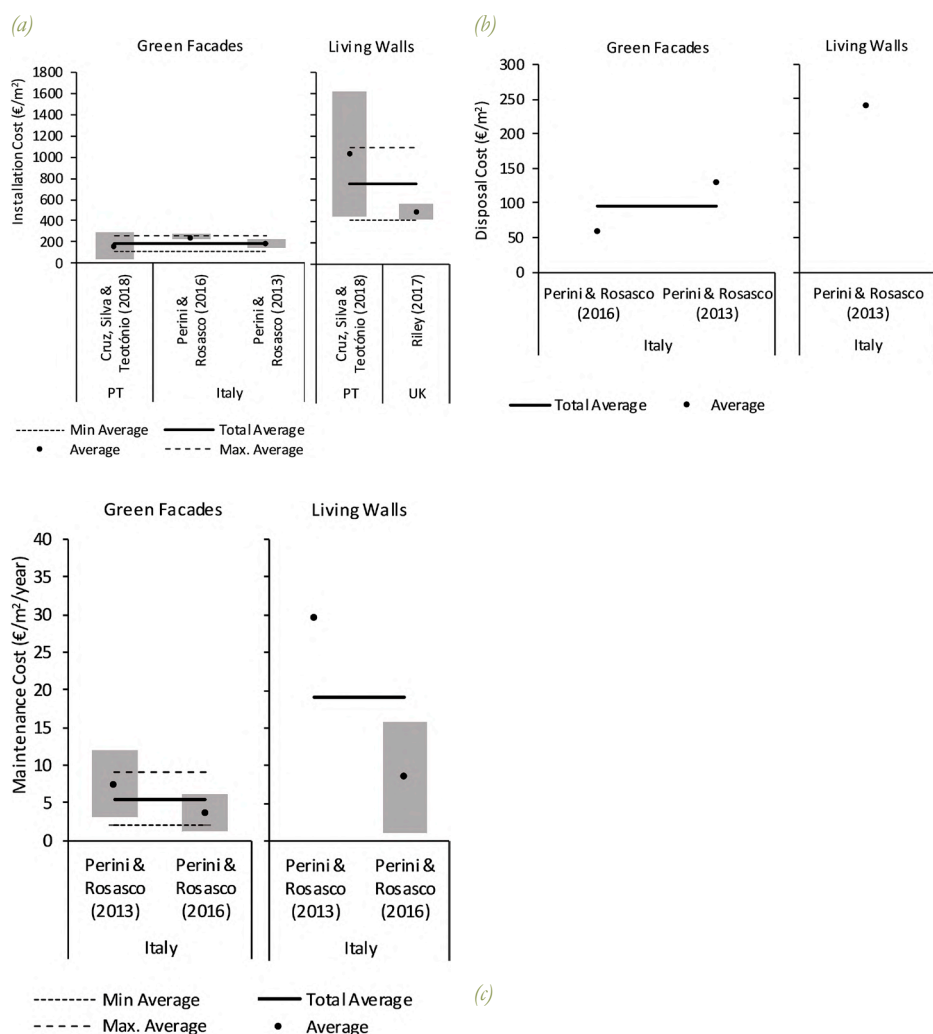
Por otra parte, para poder visualizar dichas reducciones energéticas, los resultados presentados por Libessart & Kenai (2018), quienes estudiaron la conductividad térmica de los componentes de muros verdes (*green walls*), muestran valores de 0.062 W/m °C para musgo *Sphagnum cristatum*, 0.060 W/m °C para mezcla para sembrar en exterior, 0.105 W/m °C para bolas de arcilla y 0.051 W/m °C para el sustrato usado en sistemas de vegetación vertical. Cuanto **menor es la conductividad térmica**¹⁴, **menor será la demanda energética y mayor será la capacidad aislante del material**. Además, tras realizar un modelado de muro verde (*green wall*), este autor observó la reducción de un 3% en calefacción.

12. Valor de temperatura regulada en el termostato para el sistema de climatización

13. Diferencia aritmética entre dos porcentajes. Ejemplo: pasar del 40 % al 10% es una disminución de 30 puntos porcentuales

14. Representa la cantidad de energía (calor) por segundo ($W = J/s$) que atraviesa un metro de espesor, por un grado de diferencia entre ambas caras del material

La instalación de sistemas de vegetación vertical (VGS), se realizan a través de filtros o paneles modulares que **conllevan un sobrecoste por la complicación técnica** y la necesidad de estructuras de soporte, módulos vegetales, sistemas de fijación y equipos de riego específicos (Figura 2.13.a). Este coste es aproximadamente de 400 - 600 €/m², pudiendo alcanzar incluso los 750 €/m² sin contabilizar **el mantenimiento a largo plazo que puede superar varias veces este coste**. Por esta razón, el uso de hormigón bioreceptivo puede **reducir dichos costes y simplificar la gestión**, debido a que son materiales que permiten el crecimiento y supervivencia de organismos sin necesidad de intervención humana (Jakubovskis et al., 2023).



Figuras 2.13. Costes sistemas de vegetación vertical (VGS)
 (a) Coste de instalación (€/m²)
 (b) Coste de eliminación (€/m²)
 (c) Coste de mantenimiento (€/m²/año)
 (M. Manso et al., 2021)

En conclusión, las ventajas energéticas de los sistemas industrializados, relacionadas con el ahorro energético debido a la reducción de la conductividad térmica producida por la incorporación de fachadas o cubiertas verdes, se complementan con los beneficios económicos en la instalación y el mantenimiento que suponen la **simplificación de los sistemas de envoltorio verde con hormigón bioreceptivo**.

2.4.3. LIMITACIONES

Los numerosos beneficios de los sistemas bioreceptivos engloban tanto los que proporcionan los sistemas industrializados estudiados (sistemas de vegetación vertical y cubiertas verdes), como los propios relativos con el término bioreceptividad (económicos, sociales, sanitarios, urbanos, etc.). Sin embargo, es fundamental conocer las limitaciones de estos materiales para tenerlas en cuenta en su aplicación y para abrir nuevas líneas de investigación para su mejora (Apartado 5.3).

En primer lugar, se observa que la **colonización biológica está altamente condicionada por factores ambientales y propiedades extrínsecas al material**, ya que depende de la orientación, la humedad ambiental y la radiación solar, lo que produce resultados heterogéneos y poco previsibles en el tiempo (S. Manso et al., 2015). De la misma manera, Ramírez et al. (2010) explican que la humedad condiciona la presencia y actividad metabólica de los organismos fotoautótrofos¹⁵ como cianobacterias y algas verdes, es decir, limitan la compatibilidad biológica. Por otra parte, la necesidad de tener ciertos parámetros regulados, como la humedad, lleva arraigada la necesidad de proporcionar agua en climas poco húmedos, lo cual contrarresta el beneficio económico respecto a sistemas industrializados mencionado con anterioridad (Lee et al., 2025). Esto mismo ocurre en el estudio de Perini et al. (2020), mostrando la importancia de realizar más experimentos en condiciones climáticas diversas para comprobar el verdadero comportamiento de los materiales (Perini et al., 2020). Por lo tanto, el uso de hormigón bioreceptivo no es válido para todas las situaciones o todos los edificios, habrá que seleccionar bien el entorno adecuado.

15. foto- "fotó" / -autótrofo,fa :
adj. Biol. Dicho de un organismo:
Que es capaz de elaborar su propia
materia orgánica a partir de sustancias
inorgánicas; p. ej., las plantas verdes.

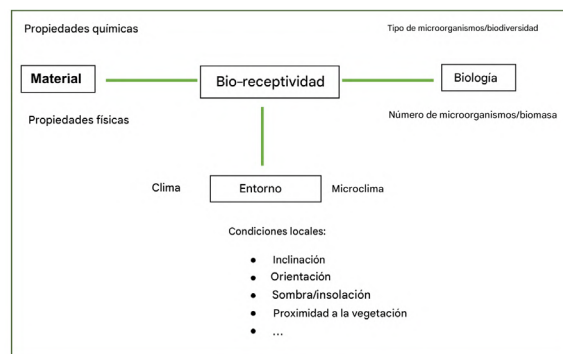


Figura 2.14. Tabla traducida de parámetros que afectan a la bioreceptividad. (Stohl et al., 2023).

En segundo lugar, la **alcalinidad de la materia prima** (pH del cemento ≈ 13) se considera en algunos estudios que puede inhibir la colonización hasta que descienda debido al proceso de carbonatación del material. Además en algunos estudios en los que se aceleró el proceso de carbonatación, gracias a la alta porosidad, se obtuvieron resultados poco homogéneos y con poca capacidad bioreceptiva (S. Manso et al., 2014), por lo que se necesitan más estudios al respecto. Por otro lado, los estudios que evalúan la importancia del pH en la bioreceptividad hacen referencia a la contradicción ya indicada con anterioridad, sobre si este factor es realmente determinante o si otros factores pueden tener mayor influencia en la colonización (Stohl et al., 2023; Veeger et al., 2021).

En tercer lugar, a pesar del cambio de paradigma propuesto por Guillitte (1995), sigue siendo un hecho objetivo que la **falta de control de la presencia de organismos** en estos sistemas, pueden relacionarse con el concepto de “biodeterioro” definido por Hueck (1965). En relación con esto, la captación y retención de humedad que favorece el desarrollo y supervivencia de los organismos, pueden conllevar efectos indeseados en el material que deben ser controlados adecuadamente. (Cutler et al., 2013)

Por ello, las limitaciones mencionadas se relacionan principalmente con la baja predictibilidad de la colonización biológica, por estética, posible deterioro y la necesidad de investigación sobre la capacidad real de autosuficiencia de los organismos vivos a lo largo del tiempo. Todo lo expuesto en esta sección refleja algunas de las líneas futuras a analizar en este campo.

3. COMPATIBILIDAD BIOLÓGICA

3.1. Agentes colonizadores



Figura 3.1. Ilustración botánica (Haeckel, 1904)

3.1.1. PLANTAS VASCULARES

A la hora de proyectar un sistema industrializado de fachada o muro verde, uno de los aspectos a tener en cuenta son las especies de plantas que van a introducirse, mecánicamente en este caso, comprendiendo su **aspecto a lo largo de las estaciones, sus cuidados básicos y la ubicación idónea** para su desarrollo. La diferencia con un sistema de hormigón bioreceptivo es la **ausencia de una subestructura adicional** para el soporte de la vegetación, la posibilidad de permitir la colonización de otros organismos y su desarrollo autónomo, provocando la reducción del mantenimiento.

Las plantas vasculares son aquellas que contienen tejidos para transportar agua y nutrientes, el xilema¹⁶ y el floema¹⁷. En cuanto a su facilidad de adhesión y anclaje, se considera que las más aptas para un sistema de hormigón bioreceptivo son las **plantas trepadoras**, que necesitan un soporte rígido al que se adhieren a través de zarcillos, raíces aéreas o tallos volubles; y las plantas que no necesitan sustrato para su desarrollo, como es el caso de las **epífitas** que se desarrollan en otras plantas principalmente leñosas sin alimentarse de ellas, y las **rupícolas** en soportes rocosos.

16. m. Bot. Tejido leñoso de las plantas vasculares, que transporta principalmente agua y minerales de una parte a otra de estos organismos.

17. m. Bot. Tejido vivo de las plantas vasculares que transporta sustancias orgánicas e inorgánicas de una parte a otra de estos organismos.



Figura 3.2. Ilustración botánica Hedera helix (Redouté, 1801-1819)













Tipo ecológico		NORTE	ESTE	SUR	OESTE
PLANTAS VASCULARES	Trepadoras perennes	FAVORABLE Sombra y humedad constante <i>Hedera helix</i> <i>Ficus pumila</i> <i>Hydrangea petiolaris</i> (F)	MUY FAVORABLE Radiación solar suave <i>Hedera helix</i> <i>Clematis vitalba</i> (F)	LIMITADO Alta radiación solar <i>Ficus pumila</i> <i>Trachelospermum jasminoides</i> (F)	FAVORABLE Alta radiación solar + calor <i>Hedera helix</i> (F) <i>Euonymus fortunei</i>
					
	Trepadoras caducifolias	LIMITADO Baja radiación solar <i>Parthenocissus tricuspidata</i> <i>Lonicera periclymenum</i> (F)	MUY FAVORABLE Radiación matinal <i>Parthenocissus tricuspidata</i> <i>Wisteria sinensis</i> (F)	MUY FAVORABLE Alta radiación solar <i>Parthenocissus quinquefolia</i> (F) <i>Vitis vinifera</i>	FAVORABLE Alta radiación vespertina (tarde) <i>Parthenocissus</i> <i>Campsis radicans</i> (F)
					
	Epífitas y rupícolas	MUY FAVORABLE Humedad constante <i>Asplenium trichomanes</i> <i>Phygodium vulgare</i> <i>Soleirolia soleirolii</i> (F)	FAVORABLE Radiación solar moderada <i>Asplenium trichomanes</i> (F) <i>Umbilicus rupestris</i>	LIMITADO Especies resistentes a la radiación <i>Sedum acre</i> / <i>Sedum album</i> (F) <i>Parietaria judaica</i>	LIMITADO Especies resistentes a la radiación <i>Sedum spurium</i> <i>Umbilicus rupestris</i> (F) <i>Crassula pellucida</i>
					

Tabla 3.1. Elaboración propia. Plantas vasculares según orientación. (F) Indica la especie de la fotografía.

3.1.2. MUSGOS

“Con el término «briófito», en sentido amplio, denominamos a plantas de tres grupos vegetales diferentes: **los musgos, o briófitos en sentido estricto**, las hepáticas y los antocerotas. Los tres grupos incluyen plantas que se llaman a veces «no vasculares»¹⁸” (Muñoz, 2023, p.14)

Los musgos acrocárpicos son los que mayor absorción sonora tienen, el *Ptychostomum capillare* es el que mejor resultados presentó en ambiente húmedo y el *G. pulvinata* en ambiente seco, la absorción sonora del musgo se concentra en frecuencias altas (1000 Hz). En cuanto a los resultados testados en el hormigón bioreceptivo, se concluye que es menor la absorción en fachadas con sustrato, el rendimiento varía dependiendo de la humedad y cobertura del musgo, es efectivo en frecuencias entre 2000 y 4000 Hz y el rendimiento es similar a estructuras verdes con plantas trepadoras. (Veeger et al., 2025).

Para el análisis de los musgos se opta por una **clasificación ecológica y funcional, en función de su dependencia hídrica y tolerancia a la radiación**, no se trata de una clasificación taxonómica¹⁹. Los **musgos higrófilos** son organismos que prefieren ambientes húmedos, los **mesófilos urbanos** se desarrollan en temperatura y humedad medias y **los xerófitos** los adaptados a un medio seco (Real Academia Española).

18. Plantas que no tienen tejidos vasculares, como el xilema y floema

19. Sistema jerárquico que organiza a los seres vivos en grupos según sus semejanza y parentesco evolutivo.



Figura 3.2. Ilustración botánica musgo (Walcott, 1925)

Tipo ecológico		NORTE	ESTE	SUR	OESTE
MUSGOS (briófitos)	Higrófilos	MUY FAVORABLE	MUY FAVORABLE	DESFAVORABLE	DESFAVORABLE
		Humedad constante <i>Hypnum cupressiforme</i> <i>Plagiommium undulatum</i> (F) <i>Brachythecium rutabulum</i>	Radiación y humedad equilibrada <i>Hypnum cupressiforme</i> (F) <i>Amblystegium serpens</i>	Desecación	Desecación
	Mesófilos urbanos	MUY FAVORABLE	MUY FAVORABLE	FAVORABLE	FAVORABLE
		Colinización estable <i>Bryum argenteum</i> (F) <i>Eurhynchium praelongum</i>	Colinización rápida <i>Tortula muralis</i> <i>Barbula unguiculata</i> (F)	Especies con resistencia moderada <i>Didymodon fallax</i>	Especies con resistencia alta <i>Didymodon rigidulus</i> <i>Ceratodon purpureus</i> (F)
	Xerófitos	LIMITADO	FAVORABLE	MUY FAVORABLE	MUY FAVORABLE
		Necesidad de alta humedad (clima) <i>Grimmia pulvinata</i>	Radiación solar moderada <i>Didymodon vinealis</i>	Alta radiación solar <i>Grimmia pulvinata</i> / <i>Grimmia laevigata</i> <i>Syntrichia ruralis</i> <i>Tortula inermis</i> (F)	Alta radiación solar + calor <i>Syntrichia ruralis</i> (F) <i>Ceratodon purpureus</i>

Tabla 3.2. Elaboración propia. Musgos según orientación. (F) Indica la especie de la fotografía.

3.1.3. LÍQUENES

La Real Academia Española define líquen como “organismo resultante de la **simbiosis de hongos con algas unicelulares**, que crece en sitios húmedos, extendiéndose sobre las rocas o las cortezas de los árboles en forma de hojuelas o costras grises, pardas, amarillas o rojizas.”

En el estudio de Manso Blanco (2014), se hace mención a la eficiencia del alga *Chlorella vulgaris*, en cuanto a bioreceptividad. Además, en estudios posteriores indican que algas como la mencionada pueden producir antibióticos (*Chlorellin*) que mejoran el crecimiento de otros microorganismos, debido a que combaten bacterias como *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pyogenes*, *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas aeruginosa*. Por otra parte, cabe mencionar que los hongos necesitan un entorno con un pH concreto entre 5-7. (S. Manso et al., 2015)

El concepto de “biofilm” (biopelícula), son **ecosistemas microbianos complejos** que incluyen microorganismos como bacterias, hongos, algas y cianobacterias. Son capaces de producir sustancias poliméricas extracelulares (EPS) que se ocupan de **proteger a los microorganismos, retener el agua y facilita la adhesión al sustrato**. Por otro lado, la biopelícula subaérea (SAB), es un tipo de biopelícula con mucha mayor resistencia a temperaturas y radiación solar. (Stohl et al., 2023)

Los **líquenes crustáceos** tienen mayor adherencia a superficies pétreas y un desarrollo plano, en cambio los **líquenes foliosos** tienen forma similar a la de una hoja, que se fija por estructuras especiales y crece en ambientes ricos en nitrógeno (nitrófilos).



Figura 3.3. Ilustración botánica líquen (Stephenson & Morss, 1836)

Tipo ecológico		NORTE	ESTE	SUR	OESTE
LÍQUENES (algas + cianobacterias)	Algas verdes y cianobacterias	MUY FAVORABLE Humedad constante <i>Chlorella vulgaris</i> (F) <i>Pleurococcus viridis</i> <i>Apatococcus lobatus</i> <i>Gloeocapsa</i> spp. (cianobacteria)	MUY FAVORABLE Radiación y humedad equilibrada <i>Pleurococcus viridis</i> <i>Apatococcus lobatus</i> (F) <i>Gloeocapsa</i> spp. (cianobacteria)	LIMITADO Especies con necesidad de alta radiación (<i>fotoófilas</i>) <i>Trentepoblia aurea</i> / <i>Trentepoblia umbrina</i> <i>Nostoc commune</i> (cianobacteria)	LIMITADO Especies con resistencia alta <i>Trentepoblia aurea</i> (F) <i>Nostoc commune</i> (cianobacteria)
	Líquenes crustáceos	MUY FAVORABLE Colonización estable <i>Lecanora incana</i> (F) <i>Lecanora dispersa</i> / <i>Lecanora muralis</i>	MUY FAVORABLE Colonización estable <i>Lecanora muralis</i> (F) <i>Lecidea</i>	FAVORABLE Especies con necesidad de alta radiación (<i>fotoófilas</i>) <i>Caloplaca citrina</i> / <i>Caloplaca aurantia</i> <i>Aspicilia</i> (F)	FAVORABLE Especies con necesidad de alta radiación (<i>fotoófilas</i>) <i>Caloplaca</i>
	Líquenes foliosos/nitrófilos	LIMITADO Baja radiación solar <i>Physcia adscendens</i>	LIMITADO Radiación solar moderada <i>Physcia adscendens</i> / <i>Physcia tenella</i> <i>Phaeophyscia orbicularis</i> (F)	MUY FAVORABLE Alta radiación solar <i>Xanthoria parietina</i> <i>Physcia alpicola</i> <i>Flavoplaca citrina</i> (F)	MUY FAVORABLE Alta radiación solar + calor <i>Xanthoria parietina</i> (F) <i>Phaeophyscia orbicularis</i>

Tabla 3.3. Elaboración propia. Líquenes según orientación. (F) Indica la especie de la fotografía.

3.2. Propiedades extrínsecas del hormigón bioreceptivo

3.2.1. CLIMA

Tras el análisis de los diferentes agentes colonizadores, se aprecia la diferencia entre las **especies higrófilas** que se desarrollan más favorablemente en **climas templados y húmedos**, en los cuales la frecuente humedad superficial favorece la persistencia del biofilm; **y las fotófilas**, que necesitan **alta demanda de radiación solar**, dada en climas secos o mediterráneos, aunque en estos la colonización se ve limitada a las especies xerófitas, activándose la bioreceptividad tras eventos de lluvia o condensación principalmente. (Cutler et al., 2013; Ramírez et al., 2010)

La aparición de microorganismos en las muestras del estudio de Sandra Manso, dispuestas en el Parque Natural de Montseny en Barcelona y en Gante (Bélgica) presentaron diferentes resultados, lo que indica la **importancia del entorno**, debido a factores como la calidad del aire, **y el clima** por las temperaturas y la frecuencia de precipitaciones entre otros. (S. Manso et al., 2015)

Por otro lado, el **rendimiento de paneles bioreceptivos y muros verdes también se ven influenciados por el clima**. Los beneficios energéticos (Apartado 2.4.2.) son mayores en climas cálidos (Figura 3.1.) donde la reducción de la radiación incidente y temperatura de la superficie tiene mayor impacto (Susca et al., 2022); y la eficacia de los beneficios acústicos (Apartado 2.4.1.) y la bioreceptividad dependen de la humedad ambiental, relacionado directamente con el clima. (Jakubovskis et al., 2023; Lewandowski et al., 2023; Veeger et al., 2025)

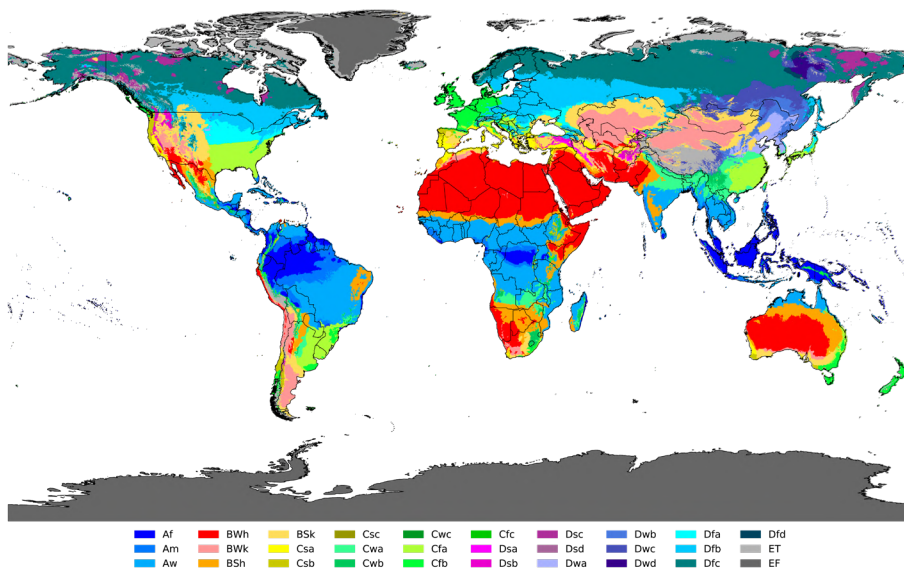


Tabla 3.4. Elaboración propia. Nomenclatura clasificación climática Köppen-Geiger

1er	2do	3er
A (tropical)	f (selva)	
	m (monzón)	
	w (sabana, invierno seco)	
B (seco)	W (desierto)	h (cálido)
	S (estepa)	k (frío)
C (templado)	w (invierno seco)	a (verano caluroso)
	f (sin estación seca)	b (verano cálido)
	s (verano seco)	c (verano frío)
D (continental)	w (invierno seco)	a (verano caluroso)
	f (sin estación seca)	b (verano cálido)
	s (verano seco)	c (verano frío)
E (polar)	T (tundra)	d (invierno muy frío)
	F (hielo)	

Figura 3.4. Clasificación climática Köppen-Geiger (Beck et al., 2023)

El clima constituye uno de los factores más determinantes en cuanto a la compatibilidad y viabilidad biológica en la bioreceptividad, debido a que **condiciona directamente la disponibilidad hídrica, radiación solar y estabilidad térmica** de la superficie de soporte, en este caso, el hormigón bioreceptivo.

3.2.2. ORIENTACIÓN Y ARQUITECTURA

La orientación de las fachadas y la composición arquitectónica influyen directamente en los agentes colonizadores capaces de desarrollarse, manifestado en la decisión de desarrollar las tablas de los diferentes organismos en base a su orientación (Tablas 3.1., 3.2. y 3.3.).

Las fachadas orientadas a norte y este suelen presentar condiciones más favorables para la colonización biológica, debido a la menor radiación solar (Figura 3.2.) o radiación indirecta que permite una mayor retención de humedad por reducir la evaporación. Por el contrario, las fachadas sur y oeste tienen mayores cargas térmicas por la radiación directa, causando desecación y patrones discontinuos en cuanto a la bioreceptividad. (S. Manso et al., 2015)

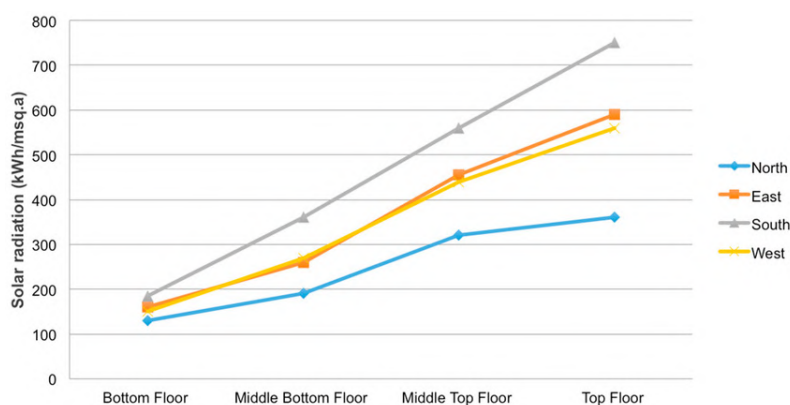
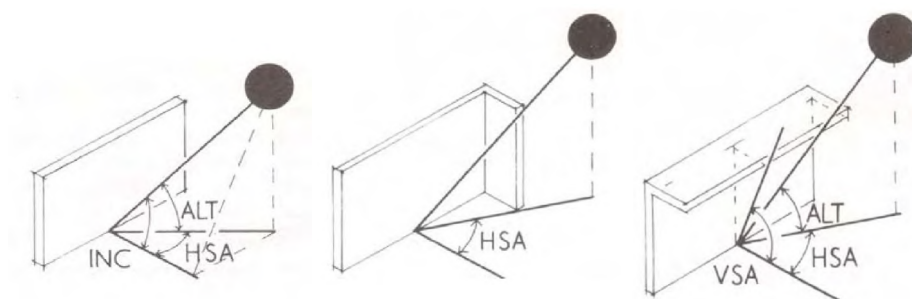


Figura 3.5. Radiación solar según orientación (Nebia & Aoul, 2017)

Desde el punto de vista arquitectónico, la geometría del edificio, presencia de retranqueos y voladizos, grandes acristalamientos y la propia densidad urbana, son condiciones que llevan implícitos factores que afectan a la colonización biológica. Estos últimos pueden ser el aumento de superficie sombreada y por consiguiente la mejora de retención de humedad, el efecto de isla de calor que puede condicionar la bioreceptividad o la inercia de los materiales y su irradiación al soporte bioreceptivo, entre otros.



Figuras 3.6. Incidencia solar (Szokolay, 1996)

En conclusión, la forma y orientación arquitectónica deben considerarse desde etapas iniciales del proyecto, usándose como **estrategia para fomentar y controlar la colonización biológica** de la arquitectura, siempre que sea lo previsto en proyecto, o en caso contrario, para evitarla.

4. PROPUESTA CON RESIDUO DE CAFÉ

4.1. Introducción

Clérigo De Santiago (2024) indica que “se estima que, cada año, la industria del café genera más de 10 millones de toneladas de residuos en todo el mundo” (p. 4).

La **economía circular** de los materiales de construcción es una estrategia que se ha desarrollado y potenciado en los últimos años, con el objetivo de **reducir el alto impacto ambiental del sector**. La **elevada disponibilidad de los residuos** de la industria del café y su **composición molecular** proporciona una oportunidad estudiada desde investigaciones como el artículo *Dosificación de hormigones ligeros con cascarilla de café* (Salazar C. et al., 1984), en el que se analiza que las cascarillas del café modifican las propiedades físicas del hormigón, como la densidad y porosidad, y pueden llegar a mejorar la resistencia a compresión del material.

Los posos del café han sido un **recurso recurrente en la industria agraria para reducir la alcalinidad de los suelos**, lo cual se ha implementado en los hábitos domésticos de cuidados de plantas, para reducir el pH del sustrato y así evitar un gasto económico en sustratos especiales para plantas acidófilas²⁰, siendo esto un símil al gasto en compuestos químicos estudiados para potenciar la bioreceptividad. Al tratarse de un compuesto orgánico, durante su **descomposición se mejora la actividad microbiana y libera nutrientes** (Figura 4.2.) como potasio (K), magnesio (Mg), calcio (Ca), fósforo (P) y principalmente nitrógeno (N), debido a la composición molecular de la cafeína (Figura 4.1.) (Hu et al., 2025). Entre estos elementos, se encuentran los **equivalentes a la composición de fertilizantes comerciales NPK**, mostrando así, que el café es una buena alternativa. Por otro lado, el motivo de la reducción de la alcalinidad se debe a su acidez intrínseca y el proceso de nitrificación ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3^-$) que genera protones (H^+) encargados de su reducción (Hardgrove & Livesley, 2016). Otro factor determinante es su **capacidad de retención de agua**, lo cual se relaciona con una de las propiedades intrínsecas necesarias para el desarrollo de un hormigón bioreceptivo.

20. Organismo que se desarrolla con preferencia en suelos ácidos. Ejemplo: azuleas, hortensias, camelias, gardenias, helechos, ...

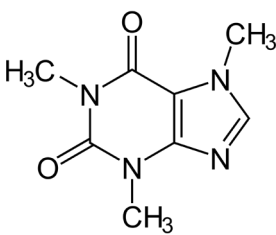


Figura 4.1. Molécula de cafeína

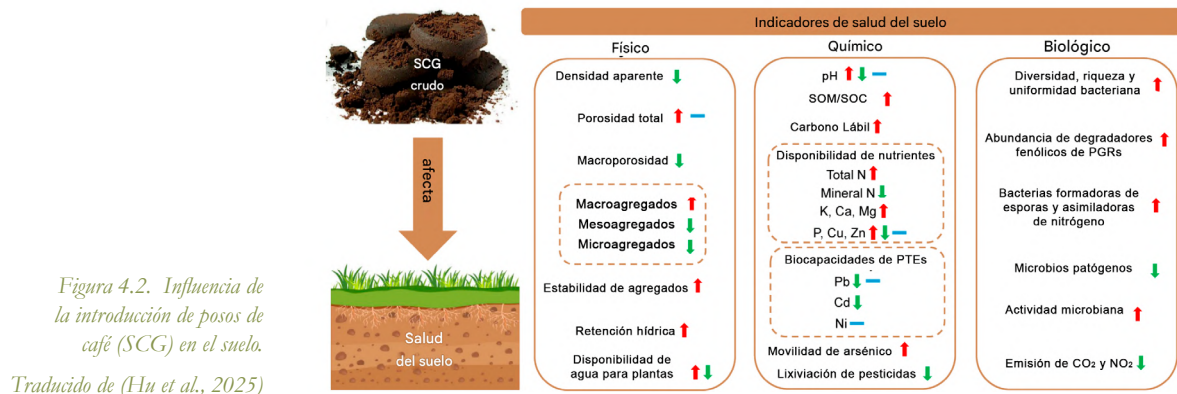
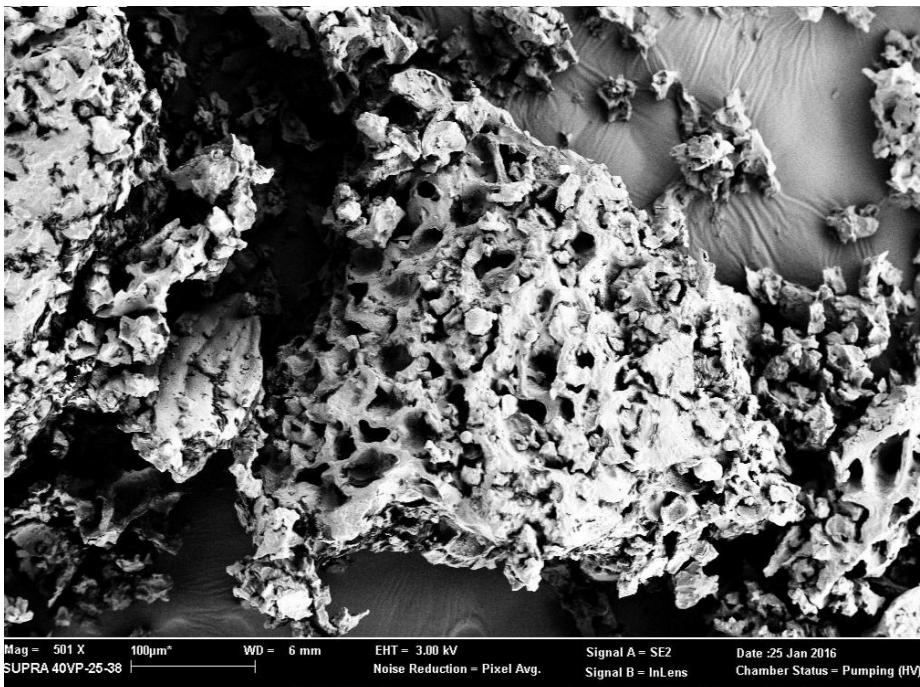


Figura 4.2. Influencia de la introducción de posos de café (SCG) en el suelo.

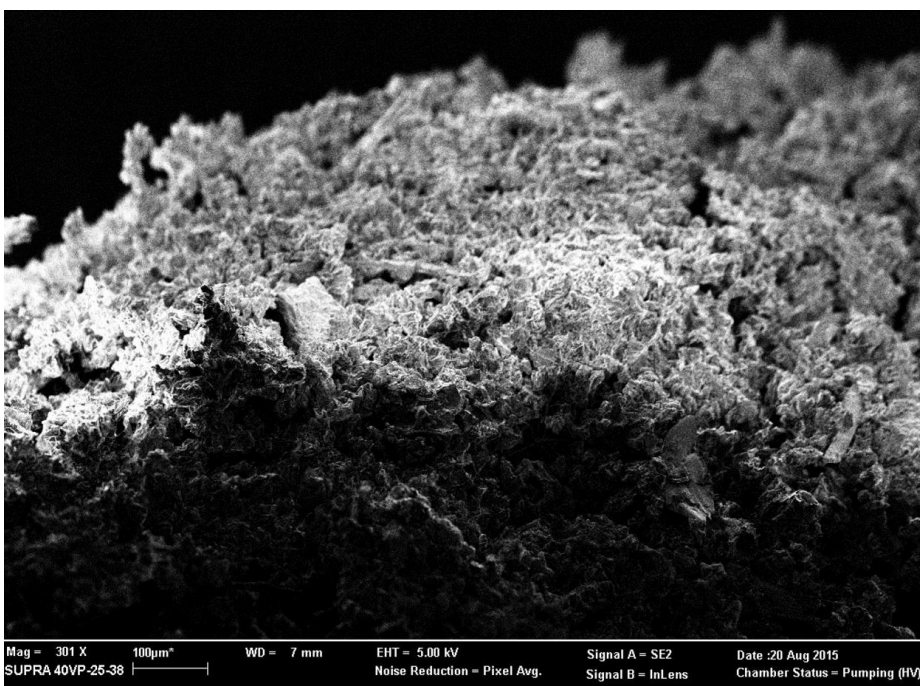
Traducido de (Hu et al., 2025)

En investigaciones recientes, se estudia el comportamiento mecánico de muestras de cemento que incorporan posos de café, indicando que este aditivo **reduce la rigidez y la resistencia y aumenta la deformabilidad del material**. En cambio, en cuanto a la bioreceptividad, los posos del café presentan una **alta porosidad superficial e interna** (Figura 4.3.), lo que causa una **mayor retención de agua** (contenido de humedad en torno al 115%), y también se **destaca su rugosidad**, observando superficies irregulares, plegadas y angulosas que puede mejorar el anclaje mecánico del biofilm (Figura 4.4.). (Kua et al., 2016, 2017).



*Figura 4.3. Imagen SEM
porosidad posos de café*

(Kua et al., 2017)



*Figura 4.4. Imagen SEM
rugosidad posos de café*

(Kua et al., 2016)

Por otra parte, Fiamingo (2017) concluye que “El café, sobre todo en altas cantidades, disminuye considerablemente el pH pero no resulta compatible con la magnesia” (p. 164), lo cual indica su incompatibilidad con el cemento de fosfato de magnesio. Por este, entre otros motivos, los objetivos específicos de este Trabajo Fin de Grado consisten en valorar una **propuesta de hormigón bioreceptivo sin necesidad de aditivos químicos**, y con la incorporación de posos de café como principal componente bioreceptivo, lo que se considera una motivación añadida por la falta de información sobre este tema en la literatura.

La introducción de posos de café, se considera una **alternativa sostenible, de bajo coste y que busca la valorización de un residuo abundante**. Además, su viabilidad se refleja tanto a nivel histórico por su uso en la botánica, como científico respaldada por investigaciones aplicadas en el sector agrario y el desarrollo de nuevos materiales de construcción.

4.2. Material de estudio

A la hora de desarrollar las muestras del estudio, se busca fijar ciertos parámetros para su posterior comparación, siendo estos equivalentes a las **propiedades intrínsecas estudiadas** con anterioridad y **la presencia de posos de café**. Se realizaron tres probetas (40x40x160mm) por cada tipo de muestra, que se fabricaron, curaron y ensayaron bajo condiciones idénticas según la norma UNE-EN 196-1:2018 (7 días en atmósfera 100% saturada).

En primer lugar, se diseñó la **muestra de referencia (R)** que consiste en un **hormigón ligero** con un cemento CEM I 42.5R, una arena fina de río (0-4 mm) al 20% y una alta presencia de árido ligero, en torno a un 60 % de arcilla expandida (4-12 mm), buscando la mejora de la bioreceptividad mencionada en el estudio de Veeger et al. (2021). Para poder ser considerado un hormigón ligero, el árido debe cumplir la norma UNE-EN 13055-1:2003 y la densidad de la muestra debe ser menor a 2000 kg/m³ según UNE-EN 206:2021, lo cual se cumplió en todas las mezclas utilizadas (Apartado 4.4. Gráfica 4.1.). No se considera la norma referente a la aplicación estructural UNE-EN 1992-1-1:2015 Eurocódigo 2, ya que el material no tiene función estructural.

R = Referencia

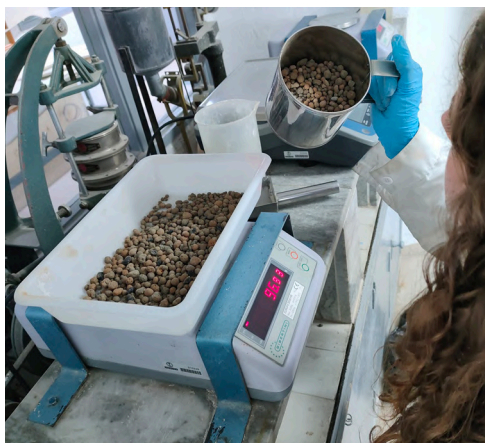
Materia	Peso (kg/1m ³)
CEM I	310,00
Agua	125,46
Arena	300,00
Arlita 4-12 (5mm)	198,00
Residuo de café	0,00



Tabla 4.1. Elaboración propia.
Dosificación muestra R.



(a)



(b)

Figuras 4.5. Fotografías propias.
(a) Mezcla R
(b) Incorporación de arcilla expandida
ETSAM, 21 octubre 2025

21. Los posos de café del estudio fueron proporcionados por los residuos producidos en la cafetería de la ETSAM – Universidad Politécnica de Madrid (Figura 4.6.c)

En segundo lugar, se diseñó la **mezcla con posos de café (RC)** tomando de base la dosificación de la referencia (R), a la que se le añadió un 6% del volumen del mortero de posos de café²¹ húmedos, lo cual modificó la relación agua/cemento de la mezcla, por ello se añade esta agua a la cantidad de agua total utilizada (Tabla 4.2). Para su cálculo, se dejó secar en la estufa una porción de peso conocido de posos de café húmedos durante 24h, para así poder obtener la cantidad de residuo de café seco introducido. Según las conclusiones de Manso Blanco (2014) la relación agua/cemento no repercute en la bioreceptividad y lo que exige la normativa es el control y la contabilización del agua total efectiva.

RC = Muestra residuo café

Materia	Peso (kg/1m ³)
CEM I	310,00
Agua	261,59
Arena	300,00
Arlita 4-12 (5mm)	198,00
Residuo de café	38,87

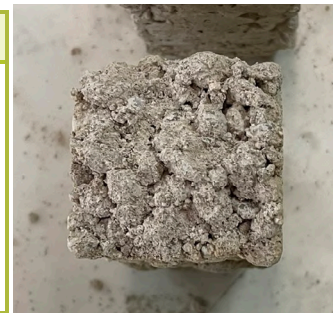


Tabla 4.2. Elaboración propia. Dosificación muestra RC.



Figuras 4.6. Fotografías propias.
 (a) Incorporación posos de café
 (b) Mezcla RC
 (c) Marca de café utilizada
 ETSAM, 21 octubre 2025

En tercer lugar, se diseñó una tercera mezcla donde se consideran **los posos de café como árido fino de la muestra (RCsa)**, omitiendo la cantidad de arena fina correspondiente para evaluar sus efectos en la porosidad, rugosidad y capilaridad por absorción del material.

RCsa = Muestra residuo café sin arena

Materia	Peso (kg/1m ³)
CEM I	310,00
Agua	261,59
Arena	0,00
Arlita 4-12 (5mm)	198,00
Residuo de café	38,87



Tabla 4.3. Elaboración propia. Dosificación muestra RCsa.

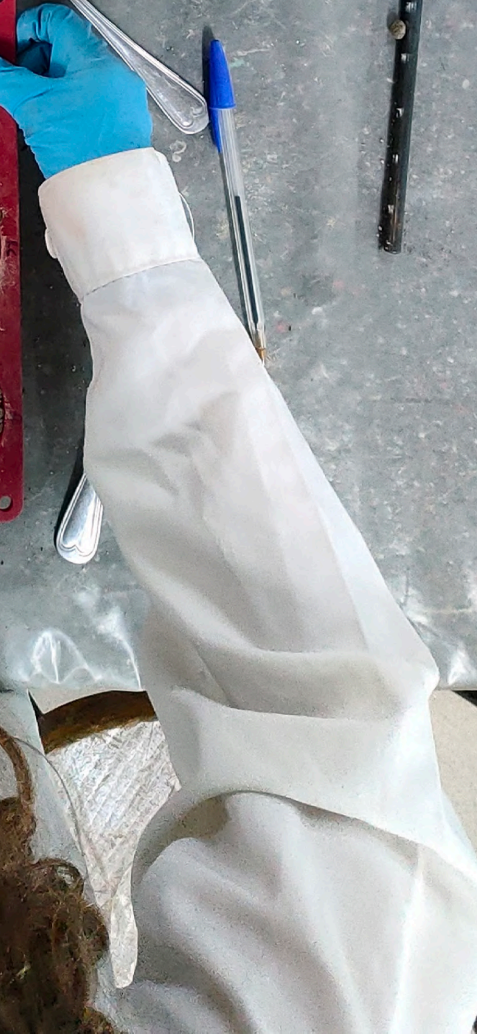
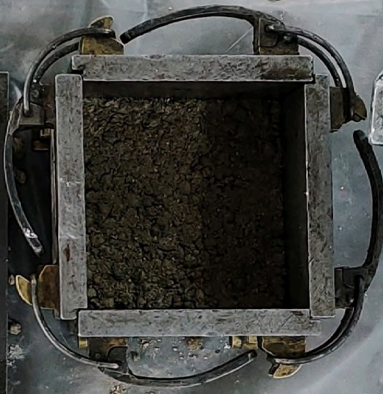
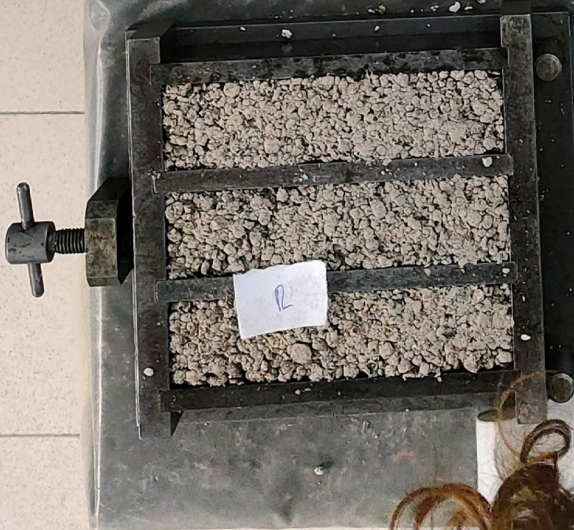


Se observa la fragilidad de la segunda probeta RC, debido a la incorporación de posos de café.

Figura 4.7. Fotografía propia. Probetas desencofradas ETSAM, 29 octubre 2025



Figuras 4.8. Fotografía propia. Preparación de muestras. ETSAM, 21 octubre 2025



4.3. Ensayos de laboratorio

4.3.1. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

Densidad aparente D_{AP} (g/cm^3), porosidad abierta P_{ab} (%) y coeficiente de absorción C_{abs} (%)

Se siguió el procedimiento de “Acondicionamiento de las probetas” indicado en la norma UNE-EN 196-1:2018, en el que después del **desmoldeado a las 24 horas** las muestras se introdujeron en agua para el **proceso de curado del material durante 7 días** (Figura 4.9). En este momento, con las muestras completamente saturadas de agua, se obtuvo el peso saturado de las muestras (P_{sat}). Posteriormente, se realizó el método de pesada en balanza hidrostática fijado por la UNE-EN 1936:2007 para determinar el peso sumergido (P_{sum}). Finalmente, y tras ser **secadas en estufa por más de 48h** (Figura 4.10.a) se obtuvo el peso seco (P_{sec}). El peso natural (P_{nat}) se midió con anterioridad, a 24 horas tras su desmoldado.

Las siguientes ecuaciones muestran las relaciones de estos pesos obtenidos necesarias para determinar la densidad aparente, porosidad abierta y el coeficiente de absorción (UNE-EN 13369:2024):

$$D_{AP} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{P_{sec}}{P_{sat} - P_{sum}} \quad P_{ab} (\%) = \frac{P_{sat} - P_{sec}}{P_{sat} - P_{sum}} \cdot 100 \quad C_{abs} (\%) = \frac{P_{sat} - P_{sec}}{P_{sec}} \cdot 100$$



Figura 4.9. Fotografía propia.
Curado de probetas
ETSAM, 29 octubre 2025



Figuras 4.10. Fotografía propia.
(a) Probetas en estufa
(b) Medición de peso de probetas
ETSAM, octubre 2025

Resistencia mecánica σ (N/mm²)

Los ensayos para determinar la resistencia mecánica a flexión y compresión se realizaron siguiendo la UNE-EN 196-1:2018, norma de referencia para probetas 40x40x160mm.

El **ensayo a flexión** se llevó a cabo colocando las probetas horizontalmente sobre dos apoyos distanciados 100mm (L). La máquina de ensayo aplicó una carga creciente perpendicular en el centro de la probeta, hasta producirse la rotura, definiendo así la carga de rotura (F), con la cual se define la resistencia a flexión según la siguiente ecuación:

$$\sigma \left(\frac{N}{mm^2} \right) = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2} \quad b = \text{ancho probeta } 40\text{mm}; d = \text{alto probeta } 40\text{mm}$$



Figura 4.11. Fotografía propia.
Ensayo de flexión
ETSAM, 23 noviembre 2025

Tras el ensayo anterior, cada probeta quedó dividida en dos mitades que se utilizaron para el **ensayo de compresión**. Cada semiprobeta se centra en la capilla auxiliar que ejerce una carga hasta alcanzar la fuerza de rotura (F) y cuya resistencia a compresión se calcula dividiéndola entre la superficie (A) de la placa que aplica carga (40x40mm).

$$\sigma \left(\frac{N}{mm^2} \right) = \frac{F}{A}$$



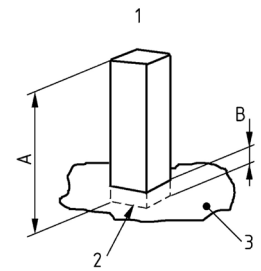
Figura 4.12. Fotografía propia.
Ensayo de compresión
ETSAM, 23 noviembre 2025

Capilaridad por absorción

El ensayo de absorción de agua por capilaridad se realizó según la normativa UNE-EN 1015-18:2007. Las probetas se recubrieron de plástico transparente dejando sin recubrir 10mm en la parte inferior, debido a que esta estará en contacto con el agua. Posteriormente se depositaron las **muestras verticalmente sobre una malla** separada del recipiente, de manera que **únicamente la base inferior de la probeta quedase en contacto con el agua**. Al inicio del ensayo se anotó la masa de cada probeta con el plástico transparente, para compararla con la masa de agua absorbida cada intervalo de tiempo. Por otro lado, también se anotó la altura del agua cada intervalo, realizando una media entre las cuatro caras del prisma. Finalmente, el ensayo concluyó a las 24 horas.



Figura 4.13. Ensayo capilaridad (UNE-EN 1015-18:2003)



Leyenda

- 1 Probeta prismática
- 2 Cara de rotura del prisma
- 3 Superficie de agua

A Aproximadamente, 80 mm

B Profundidad de inmersión de 5 mm a 10 mm*

* 10 mm si la superficie es muy rugosa

Figura 4.13. Fotografía propia.
Ensayo de capilaridad
ETSAM, 13 noviembre 2025

Figuras 4.14. Fotografías propias.
Capilaridad muestra R
(izq.) y RC-RCsa (dcha.)
ETSAM, 13 noviembre 2025

Conductividad térmica λ (W/mK)

22. *Potencia térmica (Q) = Cantidad de energía térmica por unidad de tiempo que la placa caliente introduce en la muestra (W)*

23. *Densidad de flujo de calor (q) = Transferencia de calor que atraviesa el material, desde la placa caliente hacia la zona más fría (W/m²)*

24. *Gradiente térmico (dT/dx) = Diferencia de temperatura entre dos puntos del material (K/m)*

La determinación de la conductividad térmica por el **método de la placa caliente** se regula conforme la normativa UNE-EN 12664:2002. Consistiendo el ensayo en depositar la muestra en contacto con la placa, que aplica una potencia térmica²² constante estableciendo un flujo de calor²³ a través del material, cuya comparación con el gradiente térmico²⁴ determina la conductividad térmica.

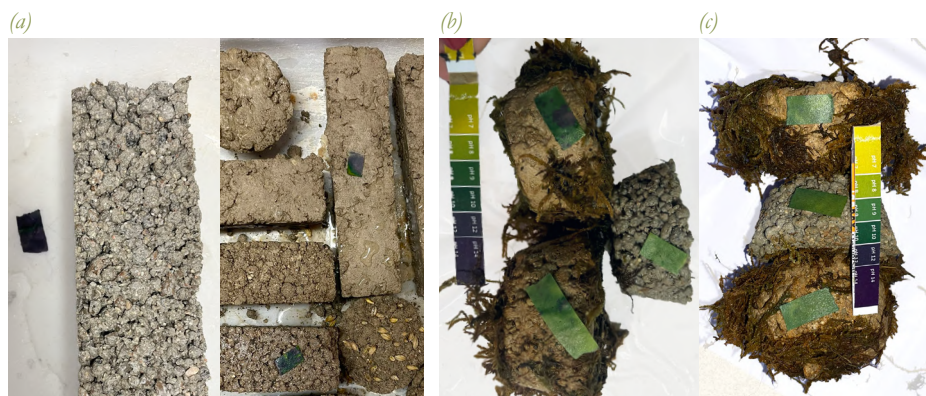


Figuras 4.15. Fotografías propias. Ensayo de conductividad térmica muestra R (izq.) y RC con musgo *Sphagnum* (dcha.) ETSAM, 16 diciembre 2025

Medición de pH

La evaluación de la posible reducción del pH superficial a lo largo del tiempo se realizó mediante el **uso de tiras reactivas de pH con mediciones semanales**. El ensayo consistía en sumergir ligeramente en agua la tira reactiva y depositarla en la superficie de la probeta, evaluando el progreso de cambio de color. La lectura del pH se realizó teniendo en cuenta factores como la velocidad de aparición del color y la homogeneidad del resultado, registrando el valor máximo mostrado en la tira. Las mediciones se repitieron hasta alcanzar unos valores que indicaban una estabilización en el tiempo y, por tanto, el resultado del estado final del material.

Debido a la ausencia de normativa para determinar el pH superficial de materiales cementicios o equivalentes (pétreos), el ensayo tiene por objetivo **analizar la evolución y comparación del pH entre las muestras**, sin pretender la obtención de un valor absoluto normativo. Se analiza la influencia tanto de la introducción de posos de café, como por las propiedades intrínsecas determinadas en las dosificaciones, como la porosidad y rugosidad.

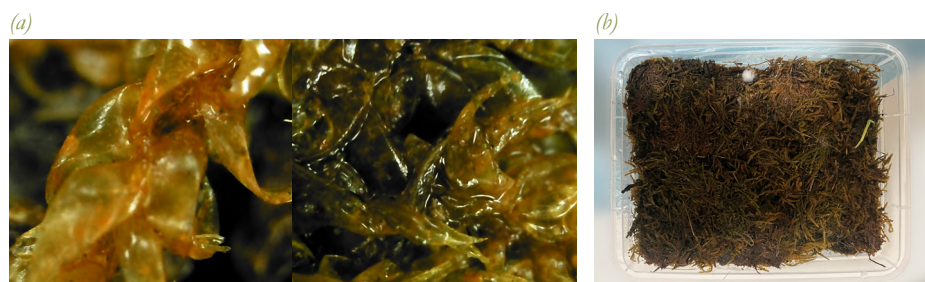


Figuras 4.16. Fotografías propias. (a) pH inicial muestra R (izq.) y RC-RCSa (dcha.), octubre 2025 (b) Resultados heterogéneos en etapa intermedia, noviembre 2025 (c) pH estable en etapa final, diciembre 2025.

4.3.2. ENSAYOS COMPATIBILIDAD BIOLÓGICA

Adhesión de musgo

Para evaluar la capacidad de las muestras para favorecer la colonización superficial, se realizó con un **enfoque experimental** el ensayo de adhesión de musgo del género *Sphagnum*²⁵ (Figura 4.17.a): Para ello, se introdujeron las muestras en un **recipiente hermético junto con el musgo** (Figura 4.17.b) mencionado durante 8 semanas, evaluando semanalmente la adhesión del musgo mediante una **agitación manual controlada** de 20 segundos por cada muestra, seguida de **forzar su desprendimiento mecánico leve** tirando del musgo.



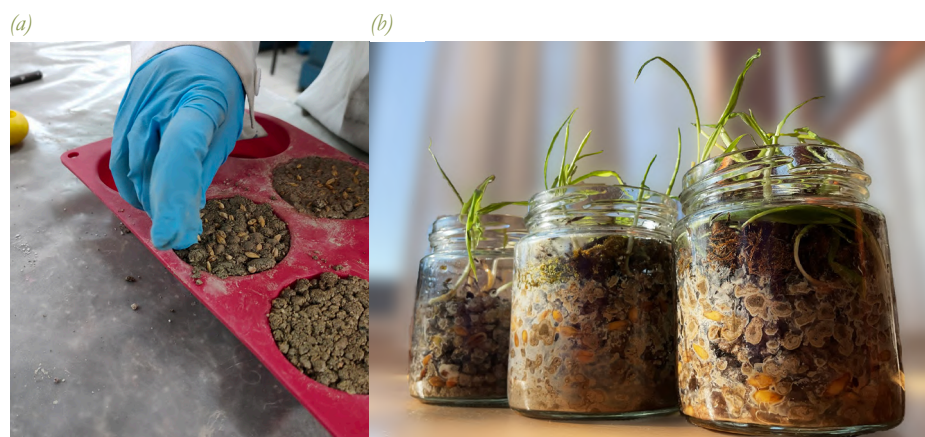
25. Género de musgos conocidos como musgos de turbera, utilizados y comercializados para horticultura, jardinería y botánica. Se emplea en terrarios, kokedamas, bonsáis u otras aplicaciones para retener humedad, como combinarlo con la corteza de pino para las orquídeas.

Figuras 4.17. Fotografías propias.
(a) Musgo *Sphagnum*
(b) Recipiente hermético

Desarrollo de semillas

Se hicieron probetas para realizar un ensayo de desarrollo de semillas *Hordeum vulgare*²⁶. En ningún caso se pretende realizar un hormigón que incluya semillas, se trata de un **ensayo experimental para comprobar la compatibilidad del material con el crecimiento y supervivencia vegetal**.

Se introdujeron las **semillas en la mezcla en estado fresco** antes del endurecimiento, tras el fraguado se realizó un seguimiento visual para comprobar si las semillas llegaron a germinar y desarrollarse. En un primer intento (Figura 4.18.a), se utilizó el mismo molde que el del ensayo para la adhesión con el musgo, en cambio las semillas afectaron mecánicamente al material descomponiéndolo en partes difíciles de evaluar, por ello se realizó un segundo intento en recipientes herméticos de vidrio (Figura 4.18.b) que evitan este problema, y en los que se introdujo musgo *Sphagnum* para conservar mayor humedad y ayudar a la germinación de las semillas de *Hordeum vulgare*.



26. Cereal de cebada, perteneciente a la familia de las poáceas (gramíneas) y con crecimiento vegetativo rápido.

Figuras 4.18. Fotografías propias.
(a) Primer ensayo en molde de silicona
(b) Segundo ensayo en recipiente de vidrio



4.4. RESULTADOS



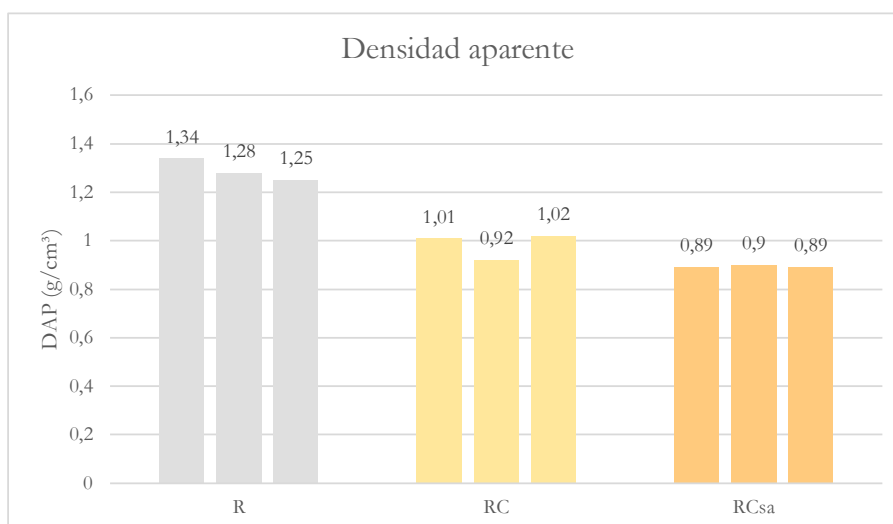
Figuras 4.20. Fotografías propias. Imágenes de muestras R (1ª), RC (2ª) y RCsa (3ª)

Densidad aparente DAP (g/cm^3), porosidad abierta Pab (%) y coeficiente de absorción Cabs (%)

		Pnat	Psat	Psum	Psec	DAP	Pab	Cabs
						$\frac{Psec}{(Psat - Psum)}$	$\frac{(Psat - Psec) \cdot 100}{(Psat - Psum)}$	$\frac{(Psat - Psec) \cdot 100}{Psec}$
						g/cm^3	%	%
R	M1	289,62	311,36	111,84	267,06	1,34	22,20	16,59
	M2	281,43	306,44	103,5	259,09	1,28	23,33	18,28
	M3	276,85	303,19	99,86	254,77	1,25	23,81	19,01
RC	M1	295,06	319,9	89,61	231,81	1,01	38,25	38,00
	M2	289,69	310,57	67,64	224,06	0,92	35,61	38,61
	M3	308,45	337,38	96,33	244,71	1,02	38,44	37,87
RCsa	M1	295,07	310,7	69,54	214,4	0,89	39,93	44,92
	M2	313,18	327,59	74,85	227,81	0,90	39,48	43,80
	M3	301,49	317,59	72,18	219,2	0,89	40,09	44,89

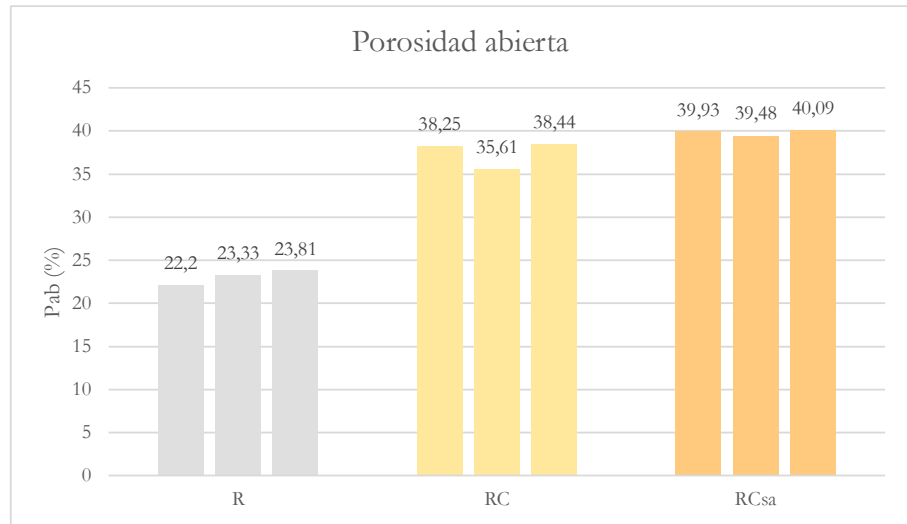
Tabla 4.4. Elaboración propia. Anotaciones y cálculos para ensayo de DAP, Pab y Cabs.

La muestra de referencia R presenta los valores más elevados de **densidad aparente**, entre 1,25 y 1,34 g/cm^3 , pero sin sobrepasar el límite de 2 g/cm^3 UNE-EN 13055-1 que determina la característica para considerarse un hormigón ligero. En las **muestras que contienen posos de café, se reduce considerablemente la densidad aparente**, comprendiendo los resultados de las muestras RC y RCsa en torno al 0,9 y 1 g/cm^3 , siendo ligeramente inferior la mezcla sin arena.

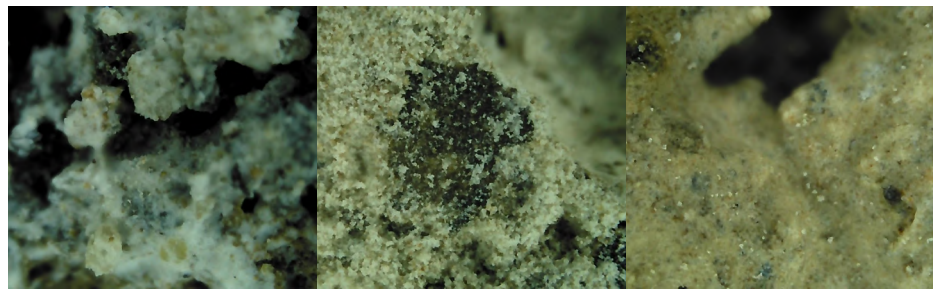


Gráfica 4.1. Elaboración propia. Resultados densidad aparente

Al contrario que los resultados anteriores, **la porosidad abierta de las muestras RC y RCsa** está entre el 36% y 40%, destacando los valores de la muestra RCsa cuyo árido fino es exclusivamente el café, siendo los **resultados aproximadamente el doble que la muestra R** del orden del 23%.

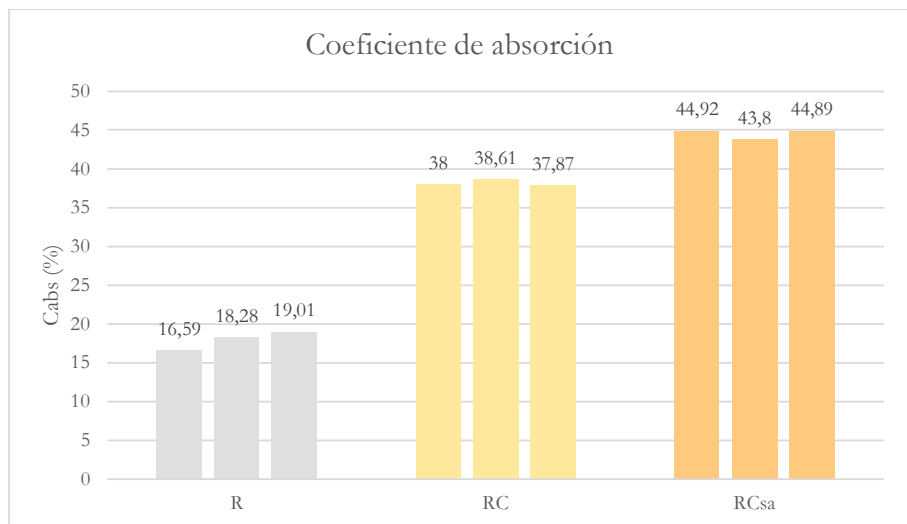


Gráfica 4.2. Elaboración propia. Resultados porosidad abierta



Figuras 4.21. Fotografías propias. Imágenes ampliadas de muestra R (1ª), RC (2ª) y RCsa (3ª)

Estos resultados coinciden con el **coeficiente de absorción de las probetas**, destacando la diferencia entre la muestra de referencia R sin posos de café con valores comprendidos entre 16,6 y 19%, la muestra RC de aproximadamente 38% y la RCsa con los valores más elevados entre 43,9% y 44,9%.



Gráfica 4.3. Elaboración propia. Resultados coeficiente de absorción

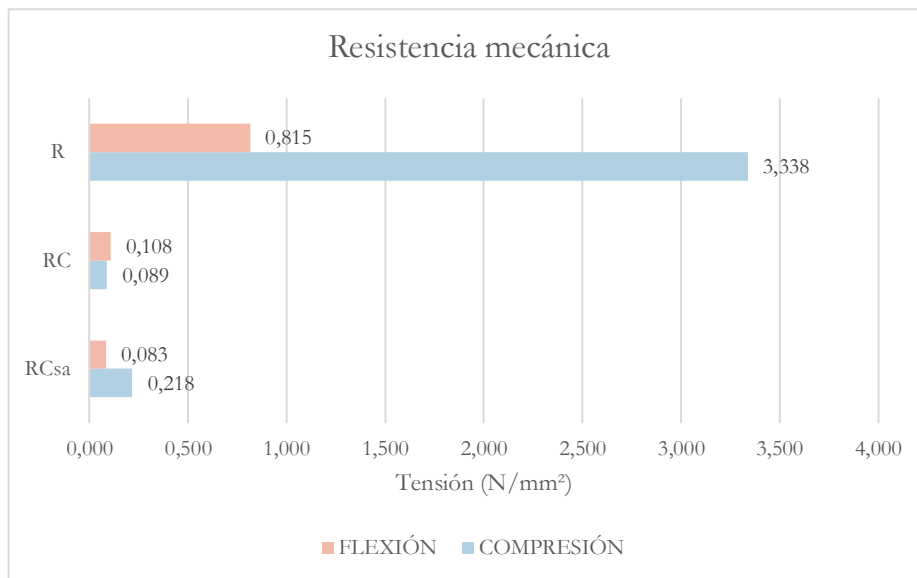
Resistencia mecánica σ (N/mm²)

		Tensión		Compresión		F/b·d	
		Flexión	$\frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2}$	Mitad "a"	Mitad "b"	Mitad "a"	Mitad "b"
		kN	N/mm ²	kN		N/mm ²	
R	M1	0,373	0,874	5,000	5,370	3,125	3,356
	M2	0,244	0,572	4,970	6,020	3,106	3,763
	M3	0,426	0,998				
RC	M1	0,046	0,108	0,122	0,150	0,076	0,094
	M2	ROTA	ROTA	0,122	0,175	0,076	0,109
	M3	ROTA	ROTA				
RCsa	M1	0,03	0,070	0,333	0,358	0,208	0,224
	M2	0,03	0,070	0,221	0,482	0,138	0,301
	M3	0,046	0,108				

F = Carga de rotura (N)
 L = luz entre apoyos = 100mm
 b = ancho probeta = 40mm
 d = altura probeta = 40 mm

Tabla 4.5. Elaboración propia. Anotaciones y cálculos para ensayo de resistencia mecánica.

La muestra de referencia **R** es la que presenta mayor resistencia a flexión y compresión, 0,815 N/mm² y 3,338 N/mm², respectivamente. Estos resultados contrastan con la resistencia mecánica de las **muestras con posos de café, obteniendo valores significativamente inferiores**. Por otro lado, se observa que la resistencia mecánica a compresión de la muestra RCsa es mayor que la RC.



Gráfica 4.4. Elaboración propia. Resultados resistencia mecánica

Capilaridad por absorción

R	Peso+film	0 min		10 min		30 min		50-60 min (1h)		120 min (2h)		180 min (3h)		360 min (6h)		1440 min (24h)	
		mm	g	mm	g	mm	g	mm	g	mm	g	mm	g	mm	g	mm	g
M1	267,42	10	282,59	20	282,09	58	282,3	60	284,08	60	254,96	70	286,65	75,13	286,44	93,13	
M2	259,23	10	273,97	20	274,54	32	274,49	65	276,99	65	277,3	85	278,4	95,15	280,22	101,6	
M3	254,93	10	267,92	15	268,53	42,5	268,2	57,5	268,78	57,5	270,3	65	271,59	95,14	273,01	94,14	
RC	M1	231	10	231,64	10	231,93	10	232,34	10	232,67	10	233,05	30	233,47	25	234,67	25
	M2	116,88	10	117,96	10	117,81	10	118,33	10	118,62	10	118,86	22,5	118,96	15	119,8	15
	M3	112,13	10	113,91	10	114,32	10	114,62	10	115,48	10	115,51	32,5	116,23	35	117,31	30
RCsa	M1	214,17	10	215,65	20	215,86	32,5	216,56	32,5	216,86	35	216,97	35	217,44	47	219,12	38
	M2	228,06	10	229,76	25	230,44	32,5	231,29	40	232,71	40	232,14	50	233,12	53,14	235,23	60
	M3	219,7	10	221,27	15	221,83	25	222,38	27,5	222,92	40	223,24	40	223,93	35,15	225,8	41,36

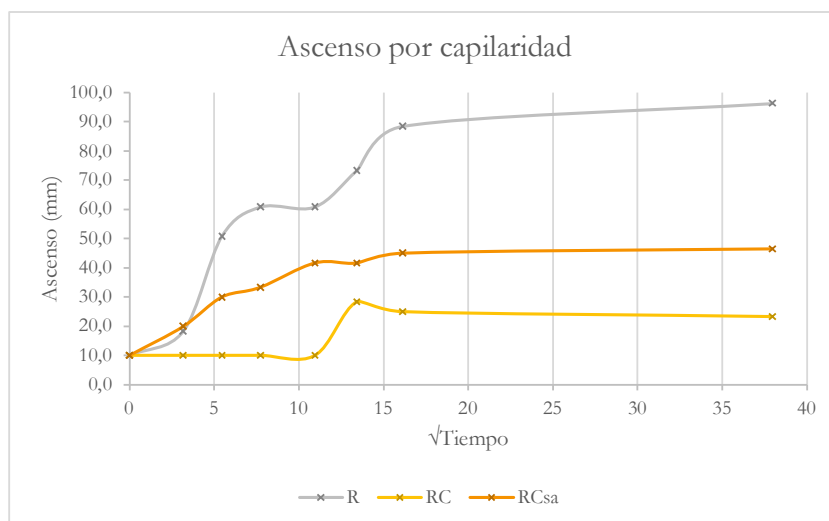
Tabla 4.6. Elaboración propia. Anotaciones ensayo de capilaridad

Los resultados del ensayo de absorción por capilaridad se representan en función de raíz de tiempo conforme a la norma UNE-EN ISO 15148:2003.

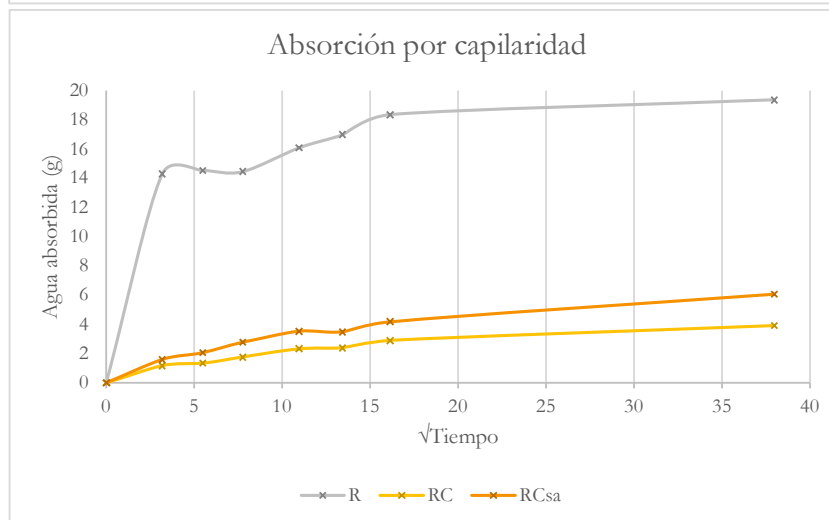
La muestra **R** obtiene los valores más elevados tanto de agua absorbida por capilaridad (g) como de altura de ascenso capilar (mm), con un incremento acelerado en los primeros 30 minutos del ensayo, y una posterior estabilización, alcanzando los 19,36g y los 96,29mm. En cuanto al agua absorbida de las probetas con posos de café, RC y RCsa, es significativamente menor que la anterior, mostrando además **pendientes más suaves y valores ligeramente superiores en la muestra RCsa**. Esto último, se incrementa en la diferencia entre probetas en el ascenso por capilaridad (mm), con una diferencia de 23,12mm entre la RC y RCsa.



Figuras 4.22. Fotografías propias. Medición ascenso por capilaridad muestras R (1ª), RC (2ª) y RCsa (3ª)



Gráfica 4.5. Elaboración propia. Resultados ascenso por capilaridad



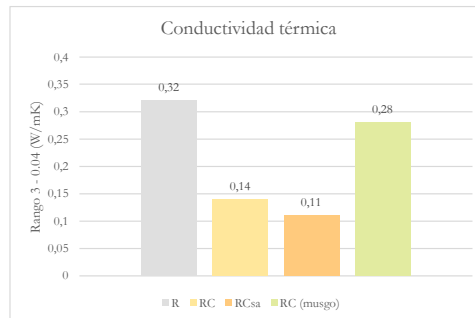
Gráfica 4.6. Elaboración propia. Resultados absorción por capilaridad

Conductividad térmica λ (W/mK)

La muestra de referencia **R** tiene la **mayor conductividad térmica** con un valor de 0,32 W/mK, cercano al resultado mostrado por la probeta RC con musgo *Sphagnum* en su superficie, de 0,28 W/mK, aunque este valor se pudo ver influenciado por la humedad presente en el propio musgo. Por otro lado, la **conductividad térmica de las probetas RC y RCsa es considerablemente inferior**.

	Conductividad térmica (λ)	
	Rango 3-0.3 (W/mK)	Rango 3-0.04 (W/mK)
R	0,35	0,32
RC	0,17	0,14
RCsa	-	0,11
RC con musgo	0,32	0,28

Tabla 4.7. Elaboración propia. Anotaciones para ensayo de conductividad térmica. Se descartaron los resultados del rango mayor.



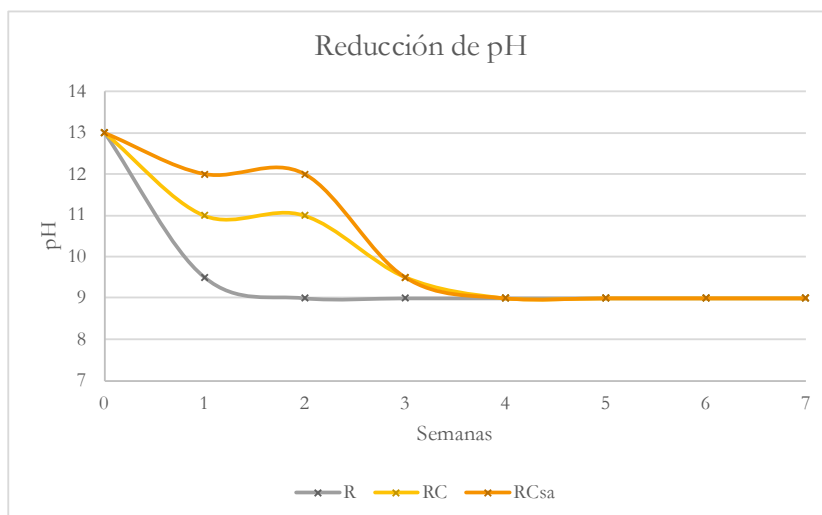
Gráfica 4.7. Elaboración propia. Resultados conductividad térmica

Medición de pH

	0ª semana	1ª semana	2ª semana	3ª semana	4ª semana	5ª semana	6ª semana	7ª semana
	28/10/2025	06/11/2025	13/11/2025	20/11/2025	27/11/2025	04/12/2025	11/12/2025	18/12/2025
R	12/14	9/10	9	9	9	9	9	9
RC	12/14	10/12	10/12	9/10	9	9	9	9
RCsa	12/14	12	12	9/10	9	9	9	9
Anotaciones	El pH alcalino se muestra instantáneamente.	Primeras apariciones de moho blanco (<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>). El musgo se desprende sin esfuerzo de las probetas sin café.	Las tiras de pH no muestran resultados homogéneos, hay zonas más alcalinas que otras.	Desarrollo exponencial de <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> en RC y RCsa. Se desprende ligeramente el musgo de todas las probetas pero se adhiere en las de café.	Los resultados anteriores no eran homogéneos, había zonas con menor pH. Se tomará el valor más alto como el más determinante.	Homogeneidad en las tiras de pH, la muestra R es la que más tarda en mostrar el pH definitivo pero todas acaban iguales.	Diferencias muy leves entre las muestras.	El pH de la RCsa es el que antes se muestra en las tiras. Se consideran los resultados estables.

Tabla 4.8. Elaboración propia. Anotaciones semanales medición de pH.

La **variación del pH de las muestras tiene un carácter descendente** en todos los casos, sin embargo, la velocidad de descenso varía dependiendo de la muestra, **hasta su estabilización con un valor de 9**. Dicha estabilización se alcanza en la muestra de referencia R en la primera semana, y al mes en las probetas RC y RCsa, observando que la muestra RC tiene menor pH en semanas previas.



Gráfica 4.8. Elaboración propia. Resultados medición de pH.

Adhesión de musgo y desarrollo de semillas

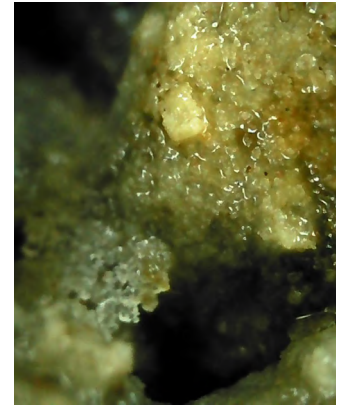
Los ensayos de compatibilidad biológica mostraron resultados positivos en las muestras con posos de café, RC y RCsa, por el contrario, el musgo *Sphagnum* se desprendió sin esfuerzo en la muestra R, tanto en las muestras del recipiente hermético, como la muestra del recipiente de vidrio para el desarrollo de semillas. Por último, las semillas de *Hordeum vulgare* se desarrollaron principalmente en la superficie de las muestras RC y RCsa, y llegaron a germinar en el interior sin desarrollar parte vegetativa. Sin embargo, a pesar de un inicial desarrollo de semillas en la muestra R, tras el desprendimiento del musgo *Sphagnum*, estas no sobrevivieron, al contrario que las primeras. Destaca por otra parte, la aparición de otros organismos en las probetas, como es el caso del *Sclerotinia sclerotiorum*²⁷, lo cual es otro signo de bioreceptividad.

27. Hongo de aspecto blanquecino y algodonoso que se desarrolla en la vegetación

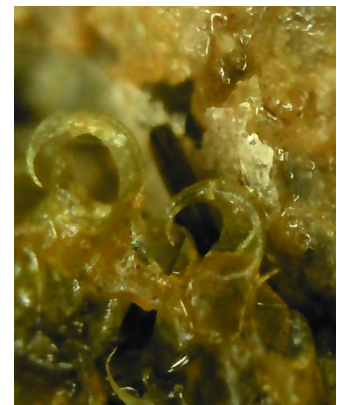
(a) Recipientes de vidrio



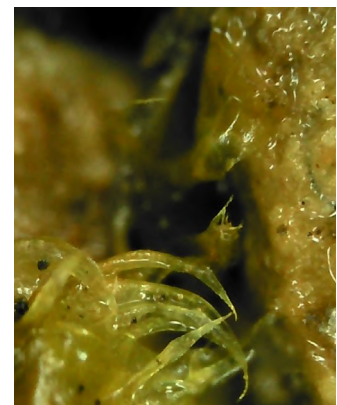
(b) Muestras de recipiente hermético



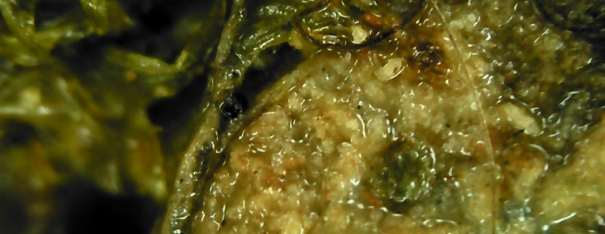
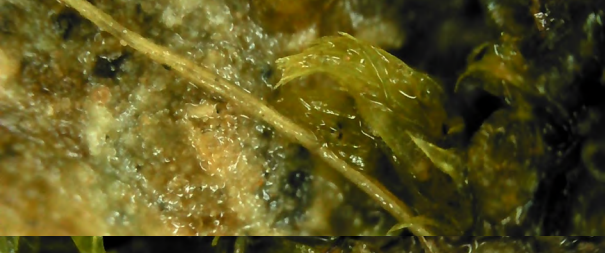
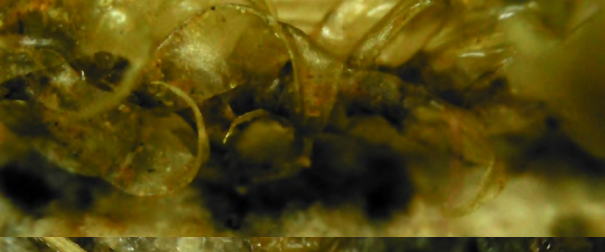
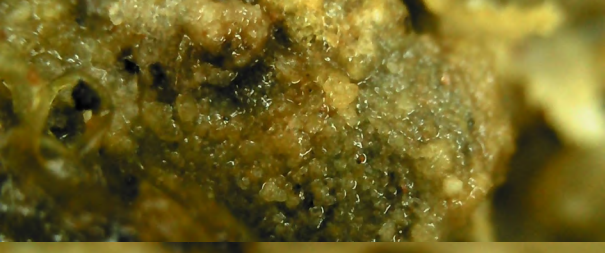
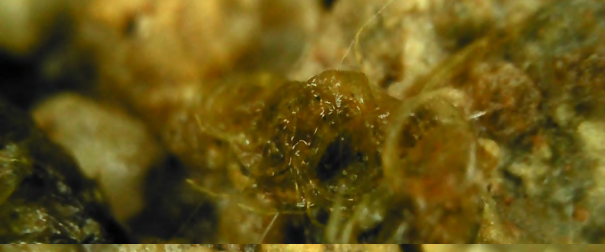
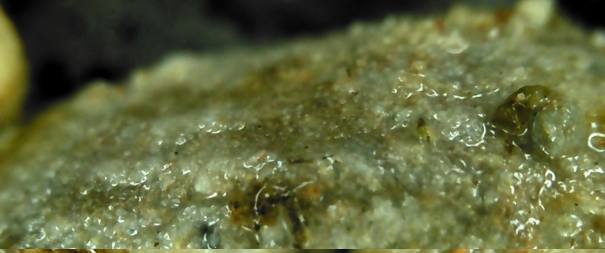
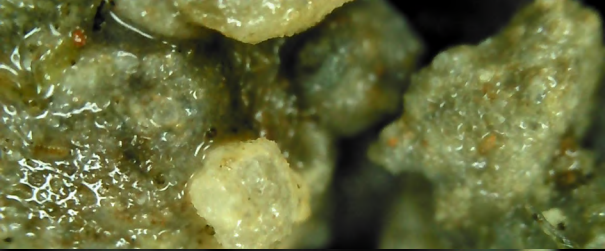
Figuras 4.23. Fotografías propias.
Compatibilidad biológica
muestra R.



Figuras 4.24. Fotografías propias.
Compatibilidad biológica
muestra RC.



Figuras 4.25. Fotografías propias.
Compatibilidad biológica
muestra RCsa.





5. CONCLUSIONES

5.1. Generales – Estado del arte

1. Los hormigones bioreceptivos vs sistemas de vegetación vertical (VGS)

El tránsito del término “biodeterioro” a “bioreceptividad” supuso un cambio en la forma de entender la relación entre los materiales de construcción y la colonización biológica, permitiendo la investigación de sus ventajas. A diferencia de los VGS, el hormigón bioreceptivo permite la colonización directa sin subestructuras adicionales, sustratos, ni sistemas de riego, reduciendo así el coste económico y mantenimiento.

Por añadidura, la integración de vegetación y nuevos organismos (biodiversidad) en la envolvente de los edificios, aportan beneficios urbanos y ambientales relacionados con la mitigación de la isla de calor, mejora de calidad de aire, atenuación acústica y reducción de la escorrentía. Además, la demanda de calefacción y refrigeración se reduce, aportando otros beneficios energéticos y económicos.

2. Importancia de las propiedades intrínsecas: Porosidad, rugosidad, capilaridad y pH

La dosificación del material determina las propiedades intrínsecas que influyen directamente con la bioreceptividad. La porosidad condiciona la ventilación interna que permite la oxigenación de los organismos; la rugosidad superficial determina la capacidad de adhesión de los agentes colonizadores; la capilaridad por absorción proporciona la acumulación y liberación progresiva de agua para la hidratación del biofilm; y el pH dicta la incompatibilidad química con soportes alcalinos. Los estudios revisados indican la actuación conjunta de dichas propiedades, siendo insuficiente la modificación aislada de un único parámetro.

3. Influencia de las propiedades extrínsecas: Clima, orientación y arquitectura

La humedad ambiental, temperatura, radiación solar y frecuencia de precipitaciones condicionan la actividad metabólica y persistencia de los agentes colonizadores, afectando la bioreceptividad. Asimismo, la orientación y composición arquitectónica influyen en la evapotranspiración y temperatura de las superficies, mostrando la importancia de integrar las condiciones para la bioreceptividad en las fases iniciales del proyecto, evitando el gasto de recursos materiales cuando es inviable la colonización biológica.

4. El empleo de posos de café como alternativa orgánica y sostenible

Se trata de un residuo abundante, económico y ampliamente disponible, cuyo empleo permite la reducción del impacto ambiental asociado al sector de los materiales de construcción, fomentando la economía circular. Además, la estructura microscópica de los posos de café presenta una elevada microporosidad superficial e interna a la vez que una superficie rugosa, también destaca su alta capacidad de retención hídrica (115%) y su acidez intrínseca que contribuye a la reducción del pH, favoreciendo la bioreceptividad. Por otro lado, su composición química contiene nutrientes (NPK) que sirven de sustrato para los organismos durante su descomposición, al tratarse de materia orgánica frente a las alternativas químicas estudiadas.

5.2. Específicas – Ensayos de laboratorio

1. La porosidad abierta es la propiedad intrínseca más influyente en la bioreceptividad

Tras la elaboración de los ensayos de laboratorio, los resultados confirman la relevancia de la porosidad manifestada en las investigaciones revisadas en el estado del arte. Esta propiedad se relaciona directamente con el proceso de carbonatación, produciendo la reducción del pH de las muestras, por esta razón, a pesar de que la muestra R tiene la menor porosidad abierta ($\approx 23\%$), sus poros son de mayor tamaño produciendo una carbonatación superficial más acelerada. En cambio, las muestras con posos de café RC y RCsa tienen valores de porosidad abierta mayores (RC $\approx 37\%$; RCsa $\approx 39,5\%$), debido a la microporosidad del café, creando cavidades tortuosas que permiten igualmente la carbonatación, pero de forma más pausada y profunda, favoreciendo además la retención y liberación hídrica.

2. La rugosidad superficial aumenta la capacidad de colonización.

Las muestras con posos de café dieron resultados favorables en cuanto a la adhesión del musgo *Sphagnum*, contrastando con su desprendimiento en la muestra R, lo cual influyó en el desarrollo y supervivencia de las semillas de *Hordeum vulgare*. Esto concuerda con que la introducción de posos de café incrementa la micro rugosidad superficial y, por lo tanto, la capacidad de adherencia del biofilm. Es cierto, que una primera evaluación visual puede determinar una mayor rugosidad superficial en la muestra R, debido a que las macro cavidades no se ocupan con los posos del café, lo cual, sí que ocurre en las muestras RC y RCsa, especialmente esta segunda cuyo árido fino es exclusivamente el café. Se concluye que para la bioreceptividad es más relevante una elevada rugosidad, pero de menor tamaño ($\approx 200 \mu\text{m}$).

3. La absorción por capilaridad y retención de agua favorecen la compatibilidad biológica

El coeficiente de absorción de las probetas con posos de café es significativamente mayor que la probeta de referencia R, siendo este último $\approx 18\%$, el de RC de $\approx 38\%$ y el valor más elevado el de RCsa de $\approx 44,5\%$. Por otro lado, en el ensayo de capilaridad, la muestra R presentó la mayor absorción de agua y ascenso por capilaridad, sin embargo, las probetas con posos de café mostraron un comportamiento más estable y progresivo en cuanto a retención hídrica, destacando la probeta sin arena RCsa. Estos resultados concuerdan con la influencia en la capacidad de retención hídrica proporcionada por la microporosidad y capacidad de absorción que generan los posos de café.

4. Los posos de café reducen la conductividad térmica

Los ensayos de conductividad térmica muestran valores considerablemente menores en las probetas con posos de café ($RC=0,14$; $RC_{sa}=0,11\text{W/mK}$) frente a la de referencia R ($0,32\text{ W/mK}$). Estos resultados refuerzan el potencial del material con residuo de café como componente de la envolvente y se alinea con los beneficios energéticos estudiados.

5. La introducción de posos de café aumenta la bioreceptividad, pero reduce las propiedades mecánicas

La norma UNE-EN 988-1:2018 fija la resistencia mecánica a compresión para morteros de revestimiento de fachadas, valor que únicamente alcanza la probeta de referencia R ($3,34\text{ N/mm}^2$). En los ensayos de resistencia mecánica a flexión y compresión se comprueba que la introducción de posos de café reduce considerablemente la resistencia del material, factor estudiado en investigaciones previas. La optimización de las mezclas con posos de café respecto a la cantidad de cemento podría resolver esta cuestión, sin perder su capacidad bioreceptiva.

5.3. Futuras líneas de investigación

A partir del desarrollo del estado del arte y los resultados del laboratorio de la etapa experimental, se proponen las siguientes líneas futuras de investigación:

1. Profundizar en la **optimización de la dosificación propuesta para la muestra RCsa**, debido a sus buenos resultados en cuanto a la capacidad bioreceptiva del material.
2. En la misma línea, se considera necesario el **uso de refuerzo de la mezcla a través de fibras** y la optimización de la **relación café/cemento** para mejorar su capacidad mecánica.
3. Por último, resulta fundamental la elaboración de estudios a largo plazo para registrar el **comportamiento bioreceptivo en diferentes condiciones ambientales y climáticas**.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Asociación Española de Normalización. (2002). *Materiales de construcción Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor* (UNE-EN 12664).
- Asociación Española de Normalización. (2003a). *Áridos ligeros Parte 1: Áridos ligeros para hormigón, mortero e inyectado* (UNE-EN 13055-1).
- Asociación Española de Normalización. (2003b). *Comportamiento higrotérmico de los materiales y productos de edificación* (UNE-EN ISO 15148).
- Asociación Española de Normalización. (2003c). *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido* (UNE-EN 1015-18).
- Asociación Española de Normalización. (2007). *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total* (UNE-EN 1936).
- Asociación Española de Normalización. (2015). *Proyecto de estructuras de hormigón* (UNE-EN 1992-1-1:2013/A1 Eurocódigo 2).
- Asociación Española de Normalización. (2018a). *Especificaciones de los morteros para albañilería* (UNE-EN 998-1).
- Asociación Española de Normalización. (2018b). *Métodos de ensayo de cementos* (UNE-EN 196-1).
- Asociación Española de Normalización. (2021). *Hormigón. Especificación, prestaciones, producción y conformidad* (UNE-EN 206:2014+A2:2021).
- Asociación Española de Normalización. (2024). *Reglas comunes para productos prefabricados de hormigón* (UNE-EN 13369).

- Beck, H. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., Lutsko, N. J., Dufour, A., Zeng, Z., Jiang, X., van Dijk, A. I. J. M., & Miralles, D. G. (2023). High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901–2099 based on constrained CMIP6 projections. *Scientific Data*, 10. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02549-6>
- Carter, N. E. A., & Viles, H. A. (2005). Bioprotection explored: the story of a little known earth surface process. *Geomorphology*, 67(3-4), 273-281. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.10.004>
- Clérigo De Santiago, J. (2024). *Valorización de residuos de la industria cafetalera como fuente de productos bioactivos* [Trabajo Fin de Máster, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid]. UVaDOC. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/70688>
- Coma, J., Pérez, G., de Gracia, A., Burés, S., Urrestarazu, M., & Cabeza, L. F. (2017). Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. *Building and Environment*, 111, 228-237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.014>
- Cutler, N. A., Viles, H. A., Ahmad, S., McCabe, S., & Smith, B. J. (2013). Algal 'greening' and the conservation of stone heritage structures. *Science of The Total Environment*, 442, 152-164. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.050>
- Fiamingo, F. (2017). *Hormigones biológicos* [Trabajo Final de Máster, Escuela Técnica Superior de Arquitectura y Edificación, Universidad Politécnica de Cartagena]. Repositorio Digital UPCT. <http://hdl.handle.net/10317/7033>
- Garzón Barrero, J. (2023). *Caracterización del fenómeno de islas de calor urbano en una ciudad tropical andina colombiana (Cartago, Valle del Cauca) integrando variables ambientales* [Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo Digital UPM. <https://oa.upm.es/76886/>
- Guillitte, O. (1995). Bioreceptivity: a new concept for building ecology studies. *Science of The Total Environment*, 167(1-3), 215-220. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04582-L](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04582-L)
- Guillitte, O., & Dreesen, R. (1995). Laboratory chamber studies and petrographical analysis as bioreceptivity assessment tools of building materials. *Science of The Total Environment*, 167(1-3), 365-374. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04596-S](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04596-S)
- Hardgrove, S. J., & Livesley, S. J. (2016). Applying spent coffee grounds directly to urban agriculture soils greatly reduces plant growth. *Urban Forestry and Urban Greening*, 18, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.02.015>

- Hortelano, S. (2025). Hormigón Biológico. *En Hormigón*, 5, 31-36. <https://polired.upm.es/index.php/enhormigon/article/view/5552>
- Hu, Y., Li, J., Wu, Y., Zhang, D., Qi, Z., & Yang, R. (2025). Spent Coffee Ground and Its Derivatives as Soil Amendments—Impact on Soil Health and Plant Production. *Agronomy*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/agronomy15010026>
- Hueck, H. J. (1965). *The Biodeterioration of Materials as a Part of Hylobiology* (218.a ed.). Centraal Laboratorium TNO, Delft, The Netherlands.
- Jakubovskis, R., Malaiškienė, J., & Gribniak, V. (2023). Bio-colonization layered concrete panel for greening vertical surfaces: A field study. *Case Studies in Construction Materials*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02394>
- Kraljevich, F. (31 de julio, 2023). Un hormigón bioreceptivo que permite la fabricación de fachadas verdes. *Hormigón al Día*. <https://hormigonaldia.ich.cl/smartconcrete/respyre-un-hormigon-bioreceptivo-que-permite-la-fabricacion-de-fachadas-verdes/>
- Kua, T. A., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Du, Y. J., & Shen, S. L. (2016). Strength assessment of spent coffee grounds-geopolymer cement utilizing slag and fly ash precursors. *Construction and Building Materials*, 115, 565-575. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.021>
- Kua, T. A., Arulrajah, A., Mohammadinia, A., Horpibulsuk, S., & Mirzababaei, M. (2017). Stiffness and deformation properties of spent coffee grounds based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 138, 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.082>
- Lee, J. H., Oh, S. R., & Yang, N. W. (2025). Development and environmental evaluation of magnesia-based bioreceptive panels for vertical green facades. *Construction and Building Materials*, 486. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141890>
- Lewandowski, D., Robain, H., Clergeau, P., & Le Roy, R. (2023). Bioreceptivity of living walls: Interactions between building materials and substrates, and effect on plant growth. *Urban Forestry and Urban Greening*, 83. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127912>
- Libessart, L., & Kenai, M. A. (2018). Measuring thermal conductivity of green-walls components in controlled conditions. *Journal of Building Engineering*, 19, 258-265. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.05.016>

- Manso Blanco, S. (2014). *Bioreceptivity optimisation of concrete substratum to stimulate biological colonisation* [Tesis doctoral, Departament d'Enginyeria de la Construcció, Universitat Politècnica de Catalunya]. UPCommons. <https://hdl.handle.net/2117/95324>.
- Manso, M., Teotónio, I., Matos Silva, C., & Oliveira Cruz, C. (2021). Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110111. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110111>
- Manso, S., Calvo-Torras, M. Á., De Belie, N., Segura, I., & Aguado, A. (2015). Evaluation of natural colonisation of cementitious materials: Effect of bioreceptivity and environmental conditions. *Science of the Total Environment*, 512-513, 444-453. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.086>
- Manso, S., De Muyneck, W., Segura, I., Aguado, A., Steppe, K., Boon, N., & De Belie, N. (2014). Bioreceptivity evaluation of cementitious materials designed to stimulate biological growth. *Science of the Total Environment*, 481(1), 232-241. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.059>
- Marselle, M. R., Lindley, S. J., Cook, P. A., & Bonn, A. (2021). Biodiversity and Health in the Urban Environment. *Current Environmental Health Reports*, 8(2), 146-156. <https://doi.org/10.1007/s40572-021-00313-9>
- Muñoz, J. (2023). *Guía de campo : briófitos de los bosques ibéricos*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Nebia, B., & Aoul, K. T. (2017). Overheating and daylighting; assessment tool in early design of London's high-rise residential buildings. *Sustainability (Switzerland)*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/su9091544>
- Perini, K., Castellari, P., Giachetta, A., Turcato, C., & Roccotiello, E. (2020). Experiencing innovative biomaterials for buildings: Potentialities of mosses. *Building and Environment*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106708>
- Ramírez, M., Hernández-Mariné, M., Novelo, E., & Roldán, M. (2010). Cyanobacteria-containing biofilms from a Mayan monument in Palenque, Mexico. *Biofouling*, 26(4), 399-409. <https://doi.org/10.1080/08927011003660404>
- Salazar C., J., García O., C. D., & Olaya, J. M. (1984). Dosificación de hormigones ligeros con cascarilla de café. *Ingeniería e Investigación*, 8, 51-56. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.n8.19485>

- Sanmartín, P., Miller, A. Z., Prieto, B., & Viles, H. A. (2021). Revisiting and reanalyzing the concept of bioreceptivity 25 years on. *Science of the Total Environment*, 770. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145314>
- Stohl, L., Manninger, T., von Werder, J., Dehn, F., Gorbushina, A., & Meng, B. (2023). Bioreceptivity of concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107201>
- Susca, T., Zanghirella, F., Colasuonno, L., & Del Fatto, V. (2022). Effect of green wall installation on urban heat island and building energy use: A climate-informed systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112100>
- Szokolay, S. V. (1996). *Solar Geometry*. Passive and Low Energy Architecture International.
- Toma, B., Bénét, J., Dufour, B., Eloit, M., Moutou, F., & Sanao, M. (1991). *Glossaire d'épidémiologie animale (Vol. 239)*. Editions du Point vétérinaire, Maisons-Alfort.
- Veeger, M., Ottelé, M., & Jonkers, H. M. (2025). Evaluating mosses on bioreceptive concrete: Effective sound absorbers?. *Building and Environment*, 281. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113194>
- Veeger, M., Ottelé, M., & Prieto, A. (2021). Making bioreceptive concrete: Formulation and testing of bioreceptive concrete mixtures. *Journal of Building Engineering*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102545>

REFERENCIAS DE IMÁGENES DE “3.1. AGENTES COLONIZADORES”

- British Bryological Society. (s. f.). *Didymodon fallax*. *British Bryological Society*. <https://www.britishbryologicalsociety.org.uk/learning/species-finder/didymodon-fallax/>
- British Bryological Society. (s. f.). *Syntrichia ruralis*. *British Bryological Society*. <https://www.britishbryologicalsociety.org.uk/learning/species-finder/syntrichia-ruralis/>
- British Bryological Society. (s. f.). *Tortula truncata*. *British Bryological Society*. <https://www.britishbryologicalsociety.org.uk/learning/species-finder/tortula-truncata/>
- Conecte. (s. f.). *Umbilicus rupestris*: usos tradicionales. *Conecte*. <https://conecte.es/index.php/es/plantas/2355-umbilicus-rupestris/usos-tradicionales>
- Cultura Científica. (2021). Musgos como biomonitores pasivos de la contaminación por metales pesados. *Cultura Científica*. <https://culturacientifica.com/2021/01/22/musgos-como-biomonitores-pasivos-de-la-contaminacion-por-metales-pesados/>
- El Medi Natural del Bages. (s. f.). *Musgo Hypnum cupressiforme*. *El Medi Natural del Bages*. <https://elmedinaturaldelbages.cat/es/species/musgo-hypnum-cupressiforme-es/>
- El Medi Natural del Bages. (s. f.). *Xanthoria parietina*. *El Medi Natural del Bages*. <https://elmedinaturaldelbages.cat/es/species/xanthoria-parietina-es/>
- El Nou Garden. (s. f.). *Jazmín estrella (Trachelospermum jasminoides)*. *El Nou Garden*. <https://elnougarden.com/ca/products/jazmin-estrella-trachelospermum-jasminoides>
- El Nou Garden. (s. f.). *Madreselva de los bosques (Lonicera periclymenum)*. *El Nou Garden*. <https://elnougarden.com/products/madreselva-de-los-bosques-lonicera-periclymenum>
- Equisalud. (s. f.). *Chlorella*. *Equisalud*. <https://www.equisalud.com/wp-content/uploads/2017/04/Chlorella.webp>
- Flora Silvestre. (s. f.). *Trentepohlia aurea*. *Flora Silvestre*. https://www.florasilvestre.es/Liquenes/Trentepohlia_aurea.htm
- Gardencenter Ejea. (s. f.). *Hydrangea petiolaris*. *Gardencenter Ejea*. <https://gardencenterejea.com/plantas-trepadoras/8422-hidrangea-petiolaris.html>

- Haeckel, E. (1904). Kunstformen der Natur. *Rampixel*. <https://www.rawpixel.com/image/2271145/free-illustration-image-sea-plant-haeckel>
- Hosei University Protist Database. (s. f.). Desmococcus. *Protist Information Server*. http://protist.i.hosei.ac.jp/pdb/Images/Chlorophyta/Desmococcus_old/sp_1d.html
- In Defense of Plants. (s. f.). Tortula inermis. *In Defense of Plants*. <https://www.in-defenseofplants.com/blog/tag/Tortula+inermis>
- iNaturalist. (s. f.). Nostoc commune. *iNaturalist*. <https://mexico.inaturalist.org/taxa/319815-Nostoc-commune>
- iNaturalist. (s. f.). Plagiomnium undulatum. *iNaturalist*. <https://spain.inaturalist.org/taxa/208078-Plagiomnium-undulatum>
- Lichens Maritimes. (s. f.). Ficha de lichen n.º 1119. *Lichens Maritimes*. <https://www.lichensmaritimes.org/?task=fiche&lichen=1119&lang=en>
- Lichens Maritimes. (s. f.). Ficha de lichen n.º 31. *Lichens Maritimes*. <https://www.lichensmaritimes.org/?task=fiche&lichen=31&lang=en>
- Lichens Maritimes. (s. f.). Ficha de lichen n.º 543. *Lichens Maritimes*. <https://www.lichensmaritimes.org/?task=fiche&lichen=543&lang=en>
- Lorberg. (s. f.). Wisteria sinensis. *Lorberg*. <https://www.lorberg.com/content/files/9720/Wisteria-sinensis-718x750-proportionalsmallest.webp>
- NatureSpot. (s. f.). Lepraria incana agg. *NatureSpot*. <https://www.naturespot.org/species/lepraria-incana-agg>
- NatureSpot. (s. f.). Physcia adscendens. *NatureSpot*. <https://www.naturespot.org/species/physcia-adscendens>
- Ohio Moss and Lichen Association. (s. f.). Ceratodon purpureus. *Ohio Moss and Lichen Association*. <https://ohiomosslichen.org/moss-ceratodon-purpureus/>
- Redouté, P.J. (1801–1819). Traité des arbres et arbustes que l'on cultive en France en pleine terre. *Rampixel*. <https://www.rawpixel.com/image/569059/common-ivy-plant>
- Restauración Paisajística. (s. f.). Sedum album. *Restauración Paisajística*. <https://www.restauracionpaisajistica.com/sedum-album/>

- Stephenson, J., & Churchill, J. M. (1836). Medical botany. *Rawpixel*. <https://www.rawpixel.com/image/327129/premium-illustration-psd-john-stephenson-antique-botanical>
- Treparriscos Field Notebook. (2013). Caloplaca holocarpa. *Treparriscos Field Notebook*. <https://treparriscosfieldnotebook.blogspot.com/2013/06/caloplaca-holocarpa.html>
- Valls Garden. (s. f.). Parthenocissus quinquefolia. *Valls Garden*. <https://catalogo-vallsgarden.com.ar/producto/parthenocissus-quinquefolia/>
- Viveros González. (s. f.). Hedera helix de hoja verde. *Viveros González*. <https://viverosgonzalez.es/gb/inicio/1359780-hiedra-hedera-de-hoja-verde.html>
- Walcott, M. V. (1925). North American wild flowers. *Rawpixel*. <https://www.rawpixel.com/image/16758051/pygmy-androsace-from-north-american-wildflowers-1925-mary-vaux-walcott>
- Ways of Enlichenment. (s. f.). Lecanora muralis. *Ways of Enlichenment*. <https://www.waysofenlichenment.net/lichens/Lecanora%20muralis>
- Wikipedia. (s. f.). Barbula unguiculata. *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Barbula_unguiculata
- Wikipedia. (s. f.). Bryum argenteum. *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Bryum_argenteum
- Wikipedia. (s. f.). Campsis radicans. *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Campsis_radicans
- Wikipedia. (s. f.). Soleirolia. *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Soleirolia>

