

Sistemas vegetales que mejoran la calidad ambiental de las ciudades

JAVIER ALONSO OJEMBARRENA¹

MARIANA CHANAMPA²

PILAR VIDAL RIVAS³

RAQUEL GUERRA ARAGONÉS⁴

FRANCESCA OLIVIERI⁵

F. JAVIER NEILA GONZÁLEZ⁶

CÉSAR BEDOYA FRUTOS⁷

La Serena (Chile), octubre de 2009.

Resumen: La integración de sistemas vegetales en Arquitectura puede ser empleada como instrumento para incrementar las superficies verdes en las ciudades, posibilitando el diseño de envolventes que promuevan el ahorro energético y respondan a condiciones medioambientales específicas. Las cubiertas aljibe pre-vegetadas modulares, las fachadas vegetales de tipo opaco y tipo traslúcido han sido objeto de estudio. Dentro de los sistemas opacos, se analizaron tres soluciones: gaviones con vegetación, paneles vegetados en caja metálica y paneles vegetales en celda drenante. Referente a las soluciones traslúcidas, se propone un cerramiento vertical concebido como un invernadero extraplano con un elemento vegetal intermedio y una segunda solución constructiva diseñada como protección exterior móvil para huecos de fachada con soporte incorporado para especies trepadoras. Entre las ventajas que presentan estas estrategias cabe destacar el incremento de la humedad ambiental, la disminución de la temperatura del aire, la renovación del aire exterior y su aplicación como elementos de protección orgánica tanto en verano como en invierno.

Introducción

El presente artículo se ha realizado dentro del marco del Grupo de Investigación Arquitectura Bioclimática en un Entorno Sostenible (ABIO) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Desde el año 2007, el subproyecto número 10 *Sistemas para la Optimización del Comportamiento Eficiente de las Viviendas*, perteneciente al *Proyecto Singular Estratégico Industrialización de la Vivienda Sostenible* (INVISIO), ha tenido el objetivo de proponer nuevas estrategias sostenibles vinculadas al uso de vegetación en las envolventes, tanto de naturaleza horizontal como vertical, de los edificios.

Los sistemas desarrollados se agrupan en tres áreas: cubiertas aljibe pre-vegetadas modulares, fachadas vegetales opacas y fachadas vegetales translúcidas. Se trata de soluciones industrializadas para cerramientos que permiten la incorporación de elementos naturales en estrategias constructivas, aportando cualidades significativas en el acondicionamiento pasivo de los edificios.

Ciertas ventajas a considerar derivan del proceso de evapotranspiración, a través del cual las plantas incrementan la humedad ambiental y regulan la temperatura, suponiendo en consecuencia una mejora del *microclima*. Las especies vegetales renuevan el aire del entorno mediante el proceso de fotosíntesis.

Durante el período estival, una envolvente con estas características actuaría como un aislamiento orgánico; protegiendo del sobrecalentamiento los espacios, produciendo brisas frescas alrededor de las edificaciones y propiciando una ventilación natural. Las especies vegetales interceptarían los rayos solares antes de que se generaran fluctuaciones de temperatura en el interior. Durante el invierno, estos sistemas supondrían una óptima protección al viento, además de contribuir a mantener constantes las condiciones de temperatura interior, evitando pérdidas energéticas.

¹Estudiante de Arquitectura, proyecto fin de carrera (PFC). Miembro del Grupo de Investigación Arquitectura Bioclimática en un Entorno Sostenible (ABIO) del Departamento de Construcción y Tecnología en Arquitectura, Escuela Técnica Superior de Madrid, *Universidad Politécnica de Madrid*. Dirección: Avda. Juan Herrera, 4. 28040 Madrid. Teléfono: +34 91 336 3889.

²Arquitecta. Miembro de ABIO. Teléfono: +34 91 336 3889.

³Estudiante de Arquitectura, PFC. Miembro de ABIO. Teléfono: +34 91 336 3889.

⁴Estudiante de Arquitectura. Miembro de ABIO. Teléfono: +34 91 336 3889.

⁵Arquitecta. Doctorando en el Departamento de Construcción y Tecnologías Arquitectónicas. Coordinadora de ABIO. Teléfono: +34 91 336 3889.

⁶Doctor arquitecto. Catedrático. Director de ABIO. Teléfono: +34 91 336 4240.

⁷Doctor arquitecto. Profesor titular. Responsable de ABIO. Teléfono: +34 91 336 6555.

Envolventes vegetales

Cubiertas aljibe pre-vegetadas

Dentro de las protecciones vegetales pasivas, se propone una solución que optimice los sistemas actuales de cubierta vegetal y que se convierta definitivamente en una buena alternativa a las cubiertas invertidas contemporáneas, que apenas aportan beneficios bioclimáticos.

Tras una amplia relectura de los sistemas constructivos en cubiertas vegetales, se definieron los objetivos fundamentales que guiarían la investigación: optimización del rendimiento bioclimático de la cubierta aljibe vegetal y reducción de costes. El sistema constructivo propuesto se fundamenta en la potencialidad de conceptos como pre-vegetación, industrialización y universalidad.

Uno de los inconvenientes que las cubiertas actuales de este tipo presentan es el lento crecimiento de la vegetación. Este tardío crecimiento actúa en detrimento del ahorro energético. Por este motivo, es necesario controlar el desarrollo de la vegetación y aportar soluciones de cubierta pre-vegetada o precultivada que estén preparadas desde un primer momento para beneficiar al edificio objeto de su instalación.

La puesta en obra de la cubierta aljibe actual es algo laboriosa, requiriendo mano de obra especializada y largos periodos de construcción. Todo ello se traduce en una urgente necesidad de industrialización de la cubierta aljibe vegetal. De esta manera es posible reducir tiempo y mano de obra, recortando por tanto los costes generales del sistema.

Otro objetivo importante de la investigación ha sido la búsqueda de una solución constructiva de cubierta pre-vegetada aljibe de carácter universal, entendiendo por tal un módulo viable para toda cubierta plana, variable tan sólo según las especies vegetales y el espesor de aislante térmico seleccionados.

El sistema desarrollado consiste en la colocación de cajones de hormigón aligerado sobre cubiertas previamente impermeabilizadas. Los cajones incorporan tepes precultivados de bajo porte y aislamiento térmico. Desde la óptica de la sostenibilidad, la integración de vegetación supone un ahorro energético considerable. Por otro lado, la cobertura es el punto más vulnerable en cuanto a fluctuaciones térmicas se refiere. Durante el día, la cubierta de un edificio suele alcanzar elevadas temperaturas por su exposición directa a la radiación solar; siendo durante la noche la parte constructiva que más calor pierde. Este fenómeno habitualmente deriva en un alto porcentaje de personas insatisfechas con los espacios bajo cubierta, acudiendo a medios mecánicos de refrigeración con su consecuente contribución altamente contaminante al medio.

La vegetación es capaz de absorber el 80 % de la radiación solar mediante diferentes procesos naturales. Por este motivo supone una solución óptima en cubierta. Las especies vegetales actúan como aislamiento y protección del impermeabilizante de la radiación solar, de los cambios bruscos de temperatura y de los esfuerzos mecánicos. Se minimizan los flujos energéticos entre el exterior y el interior de la vivienda. Se aumenta el aislamiento térmico debido a que la vegetación retiene aire en su interior y filtra agua de lluvia. La cubierta se convierte entonces en una superficie útil a través del cual se evitan pérdidas energéticas, multiplicando los usos del cerramiento horizontal. El aljibe de pluviales, al aumentar la masa del sistema constructivo, también absorbe parte de la onda sonora del ruido de la ciudad, aumentando el aislamiento térmico.

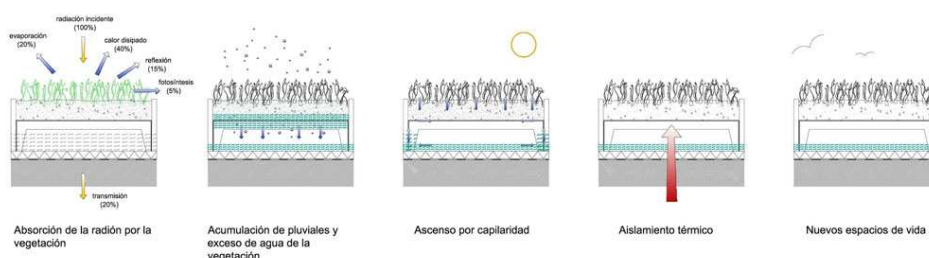


FIGURA 1: Ventajas del sistema

Por otro lado, se ha conseguido simplificar el proceso constructivo de la cubierta. Tras una primera membrana antipunzonamiento y una lámina impermeabilizante, los cajones precultivados son colocados sobre la misma.

Diversas especies de plantas conforman los tepes (sédum, festucas o romero rastrero), de carácter más o menos autóctono, a fin de que aquella especie que mejor se adapte al clima acabe colonizando

la cubierta. En general, todas ellas son especies de bajo porte, que se desarrollan con mínimos recursos hídricos y en sustratos limitados, sin requerir mantenimiento continuo, podas ni abonados.

Para su buen desarrollo, es fundamental un suelo bien drenado. El hormigón aligerado juega un papel fundamental en este punto, facilitando una evacuación del exceso de agua. El sustrato en este caso interviene en el complejo proceso de la nutrición mineral de la planta. Por el tipo de vegetación escogida, con un desarrollo radicular mínimo, el sustrato necesita ser pobre y muy bien drenado. Se propone una composición estratificada de tierra común con humus de lombriz, arena con vermiculita, arlita y polvo de escombros. Este último componente evita la evaporación en exceso del agua del aljibe en condiciones estivales.

Para facilitar la nutrición de las plantas desde el aljibe, se utiliza un fieltro sintético de fibras de poliéster situado entre el hueco existente entre los soportes de hormigón poroso. Este fieltro sintético funciona a modo de mecha, permitiendo que el agua ascienda por capilaridad.

El hormigón aligerado, que bien funciona en su labor drenante y como sustento del sustrato, aporta como desventaja un sobrepeso considerable en cubierta: un peso total por cada cubierta de aljibe prevegetada (CAP) de 46.9 kg y un sobrepeso total en cubierta de 224 kg/m². También surgen otros problemas derivados de la aplicación de este material, como las dificultades para conseguir un modelo preciso con ranuras de pequeño tamaño y orificios que permitan la unión de los módulos entre sí y que, a su vez, facilite su transporte.

La investigación está abierta a otros materiales alternativos, principalmente el PVC. Este material aporta soluciones más adecuadas en cuanto a peso y unión de piezas. Sin embargo, como desventaja cabe citar un ciclo de vida muy superior en comparación al que pueda presentar el hormigón.

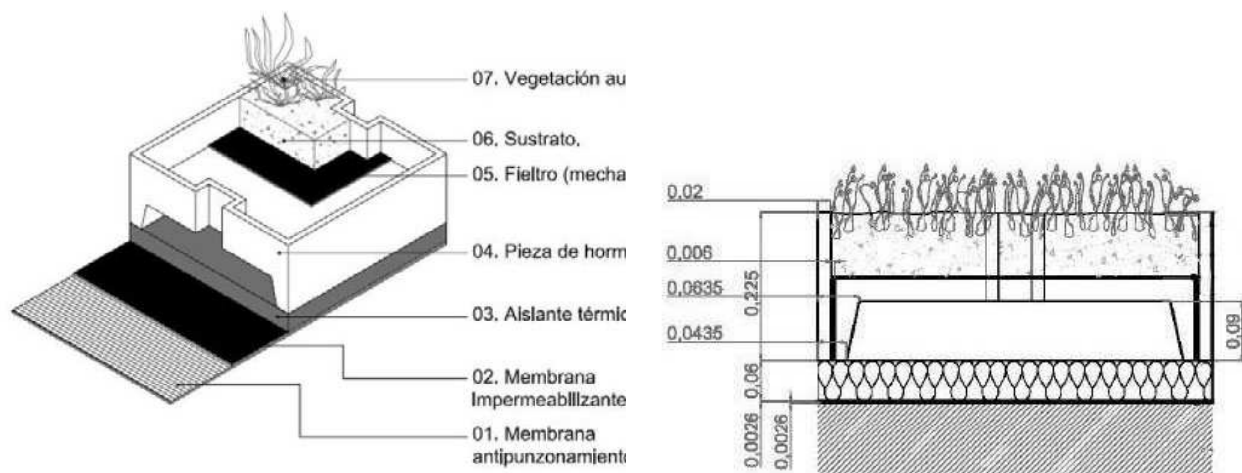


FIGURA 2: Diseño CAP en hormigón ligero

Fachadas opacas

En cuanto a las fachadas opacas, se investigaron tres soluciones: gaviones de malla electrosoldada con piedras y vegetación, paneles vegetados en caja metálica y un sistema de celdas de polipropileno con vegetación envueltas en fibra de poliéster.

Gaviones

Los gaviones son una solución de fachada industrializada a partir de módulos. Consisten en módulos de 55 x 55 cm de malla electrosoldada con piedras y todos los elementos necesarios para el crecimiento de especies vegetales en su interior. Una malla metálica de acero inoxidable, piedra, celda de drenaje de polipropileno con sustrato, vegetación, aislamiento y una estructura metálica galvanizada integran el conjunto.

La malla metálica es la estructura que alberga las piedras. Tiene que tener un tratamiento anticorrosivo, de zinc y aluminio, para protegerla de la intemperie. Su abertura y su diámetro deben ser los



CONGRESO CONSTRUCCIONES DE CUBIERTA VEGETAL

Soluciones innovadoras para cubiertas ecológicas: CUBIERTA ALJIBE PREVEGETADA MODULAR

P.M. Vidal, F. Oliveri, F.J. Neita, C. Bedoya.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

1 INTRODUCCIÓN

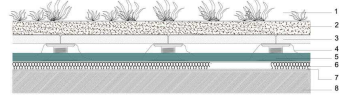
El presente estudio se ha desarrollado dentro del marco del Grupo de Investigación consolidado de la UPM (Universidad Politécnica de Madrid) ABIO (Arquitectura Bioclimática para un Entorno Sostenible). Desde el 2007 el Subproyecto 10-Sistemas para la Optimización del Comportamiento Eficiente de las Viviendas, dentro del Proyecto Singular Estratégico INVISO (Industrialización en Vivienda Sostenible) ha tenido el objetivo de proponer nuevas estrategias sostenibles en diversos ámbitos de actuación, el subproyecto se divide en seis líneas principales de investigación (Condiciones de Verano, Condiciones de Invierno, Ventilación Higiénica, Acumulación de Energía, Iluminación Natural y Gestión de Agua) desarrolladas por un equipo internacional compuesto por personal investigador, alumnos de doctorado, máster y últimos cursos de grado. En este documento se exponen de entre todas las líneas de estudio, la investigación realizada para "Condiciones de verano", aislamiento térmico con vegetación viva en paramento horizontal. Mostrando los resultados obtenidos para cubierta aljibe prevegetada en hormigón ligero.

2 ANTECEDENTES: LA CUBIERTA ECOLÓGICA

En 1994 se inició una investigación que dio como resultado la primera cubierta ecológica en España, se realizó en las instalaciones de Interper en colaboración con la UPM y ABIO. En 1996 comenzó la segunda parte de la investigación, probando diferentes soluciones constructivas, materiales y especies vegetales. Tomando como premisa los problemas encontrados en las investigaciones anteriores, desarrollamos una línea de estudio con el objetivo de mejorar y solucionar los problemas del modelo constructivo de la cubierta aljibe vegetal, que fue la que mejor comportamiento bioclimático obtuvo.

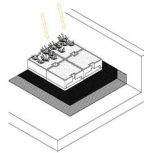


- Primera cubierta ecológica aljibe.
1. Planta tipo sedum.
 2. Substrato orgánico.
 3. Hormigón aligerado.
 4. Mecha de feltro.
 5. Filtro reguladores de altura.
 6. Aislante térmico.
 7. Capa impermeabilizante y antirrootingamiento.
 8. Soporte estructural.



3 DEFINICIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

DEFINICIÓN CAP. Unidad industrializada en hormigón ligero de la cubierta aljibe prevegetada. Funciona como protección pasiva frente a la radiación solar y mejora por enfriamiento evaporativo las estancias habitables inferiores.



OBJETIVOS DE PROYECTO.

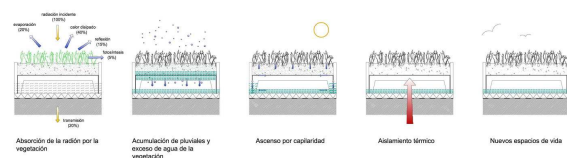
- Optimización.....Prevegetación
El mayor inconveniente descrito en estudios anteriores es el tardío crecimiento de la vegetación, que provoca el descenso del ahorro energético.
- Bajo coste.....Industrialización
La puesta en obra del CAP debe ser lo más rápida y sencilla posible para reducir costes. Industrializando en módulo reducimos tiempos y mano de obra especializada.
- Adaptabilidad.....Universalidad
Buscamos un módulo viable para toda cubierta plana, viable tan sólo en vegetación y grosor de aislante térmico.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

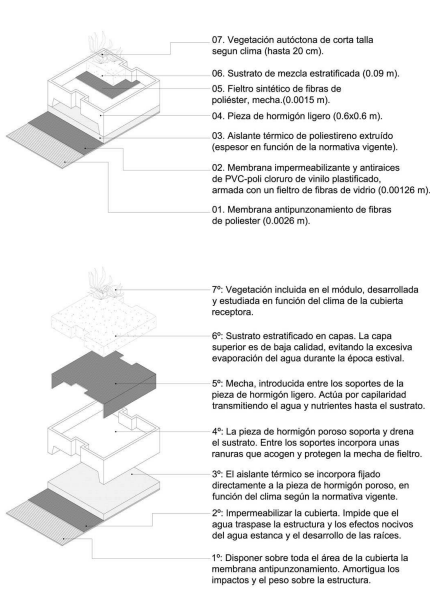
1 FUNCIONAMIENTO

Este sistema consiste en la colocación de cajones de hormigón aligerado con tepes precultivados de bajo porte y aislamiento térmico incluido, sobre cubiertas previamente impermeabilizadas.

La incorporación de vegetación en el edificio, siempre tiene efectos positivos. Desde la óptica de la sostenibilidad supone un ahorro energético importante. La cobertura es el punto más vulnerable en cuanto a fluctuaciones térmicas, durante el día alcanza elevadas temperaturas por su exposición directa a la radiación solar y, durante la noche, es la parte de la construcción que más calor pierde. Tradicionalmente en un alto porcentaje las personas insatisfechas en los espacios bajo cubierta, que acuden a medios mecánicos de refrigeración. Cabe añadir que el sobrecalentamiento de la misma cubierta invertida tradicional afecta negativamente a la impermeabilización, lo que provoca que se quebre.



2 DESARROLLO DE COMPONENTES



3 CATÁLOGO DE VEGETACIÓN

Cada tipología de vegetación ha sido escogida por alguna propiedad particular. Las especies de Sedum tienen bajo poder tapizante, pero alta resistencia y adaptabilidad al tipo de sustrato (10 cm) y escaso riego. Las tillas aportan estabilidad a la cubierta. Las Felices son un tipo de gramínea de alta resistencia y alto poder tapizante. Y el romero rastrea en antestagos y aromática. En general, todas ellas son de bajo porte, se desarrollan con mínimos recursos hídricos y con sustratos limitados. No necesitan mantenimiento continuo, pocas ni abonados.

Tipología	Nombre	Características	Uso	Imagen
1	Sedum	Bajo poder tapizante, alta resistencia, adaptabilidad al sustrato (10 cm), escaso riego.	Tapizante	[Image]
2	Tillas	Aportan estabilidad a la cubierta.	Tapizante	[Image]
3	Felices	Gramínea de alta resistencia y alto poder tapizante.	Tapizante	[Image]
4	Romero	Rastrea en antestagos y aromática.	Tapizante	[Image]

4 VALORACIÓN

El sistema prevegetado garantiza todos los ventajas de la cubierta aljibe desde el primer momento de su instalación. Al integrar el depósito de agua para el abastecimiento por capilaridad de las plantas se reduce la carga de agua que soportan las canalizaciones urbanas y se abre el camino a otras posibilidades como la reutilización de excedentes pluviales para sistemas o la protección pasiva contra incendios. El CAP supone un ahorro considerable en mano de obra especializada y mantenimiento de la cubierta, alcanzando un coste mucho más reducido y cercano a la vivienda de protección oficial. Durante su funcionamiento, la cubierta aljibe prevegetada no consume ningún tipo de energía. El sistema no necesita ningún tipo de ayuda energética o mecánica.

El proyecto de investigación también asume los principales inconvenientes. El hormigón aligerado, que bien funciona en su labor de drenaje y sustento del sustrato, aporta la mayor desventaja, el sobrepeso en cubierta. Alcanzando un peso total de cada CAP de 46.9 Kg, y suponiendo un sobrepeso en cubierta de 224 Kg/m². También encontramos otros problemas con este material, como las dificultades para conseguir un modelo preciso, con ranuras de pequeño tamaño y orificios o huecos que permitan la unión de los módulos entre sí o más fácilmente transportables. El proceso investigador está abierto a otros materiales alternativos, principalmente el PVC, que nos aporta soluciones en cuanto al peso y unión de piezas, pero que por el contrario tiene un ciclo de vida muy superior al hormigón.

FIGURA 3: Cubierta aljibe pre-vegetada modular

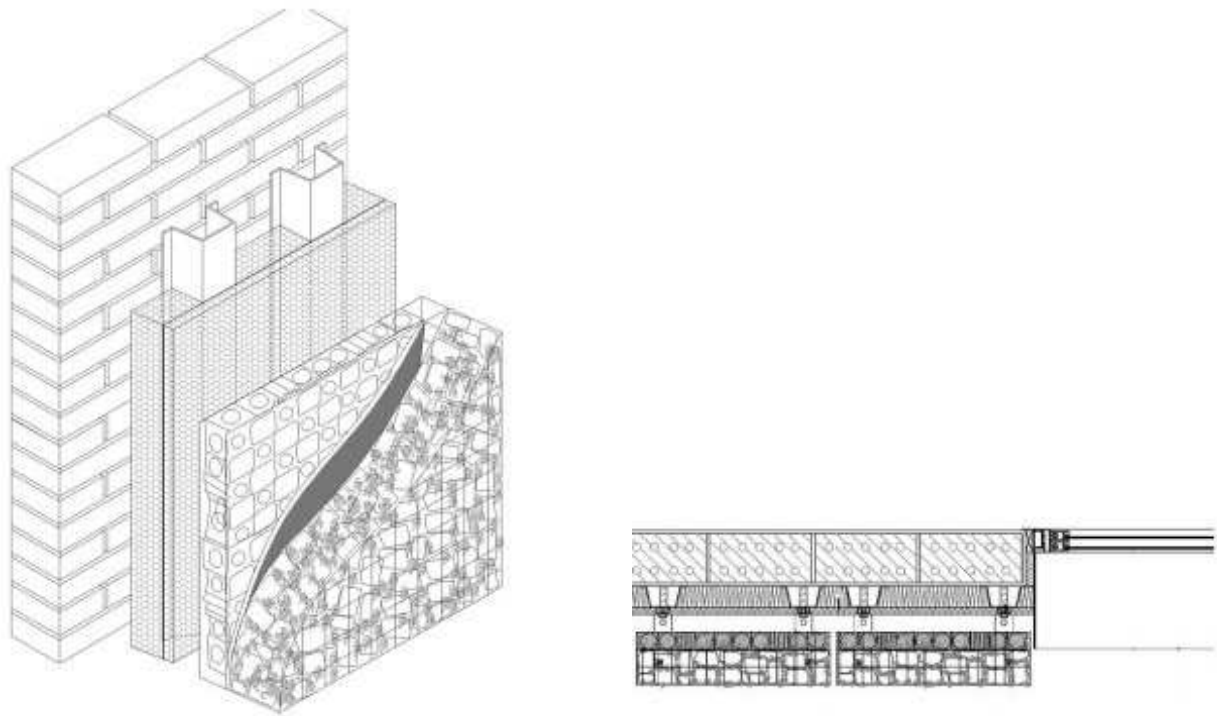


FIGURA 4: Perspectiva y sección horizontal del cerramiento

adecuados, condicionando la resistencia que tendrá el gavión en su totalidad. Si la abertura es mayor que la requerida, la resistencia por metro cuadrado será menor.

La abertura de la malla es de 50 x 50 mm. Las uniones entre las distintas caras del gavión se llevan a cabo mediante grapas de alambre de alta resistencia de 3 mm de espesor con 255 g/m². Cada 20 cm hay que colocar tensores de alambre galvanizado de 4 mm. Los tensores sirven para vincular las caras, evitar deformaciones y proporcionar compacidad al gavión. Las grapas permiten ensamblar los paneles del gavión entre sí para conformar una pieza monolítica.

Se emplean piedras que brindan diferentes cualidades de diseño al existir en el mercado de diversos colores, texturas y granulometrías. Al mismo tiempo la piedra proporciona una importante disminución de la contaminación acústica. Como la abertura de la malla en el sistema propuesto es de 50 x 50 mm, la piedra que se puede colocar en el interior puede ser de 60 mm a 90 mm. Se opta por piedras livianas como son las de origen volcánico: piedra pómez, la puzolana o piedras porosas como la *spaguetti*.

Se utilizan especies rupícolas (vegetación que crece entre las piedras) debido a que su incorporación mejora el comportamiento del muro, cambiando de aspecto con el curso de las temporadas, aumentando la humedad ambiental y disminuyendo la temperatura del aire. Por otro lado, la vegetación también actúa sobre la contaminación, siendo las partículas y los metales pesados depositados aprovechados o metabolizados por la microflora (hongos y bacterias) incluidas en el sustrato. La presencia de especies vegetales genera brisas que refrescan el ambiente alrededor de las viviendas: al refrescar la temperatura se genera un flujo de aire, ya que el desequilibrio entre pequeñas masas de aire a diferente temperatura y por tanto diferente densidad, genera esta circulación natural. En el caso de orientaciones muy expuestas a fuertes vientos reducen la velocidad del viento en la proximidad del muro.

La estructura del gavión tiene que brindar la posibilidad de que si en algún módulo no se da el correcto desarrollo de la especie vegetal elegida se pueda optar por su sustitución. Algunas de las especies seleccionadas son las siguientes: la *Achillea Tomentosa* (Milenrama amarilla), *Cerastium Tomentosum* (Canastilla de plata), *Cheiranthus cheiri* (Alhelí amarillo), *Erigeron karvinskianus* (Vitadinia), *Aubrieta X Cultorum* (Cascade azul), *Lobularia marítima* (Aliso de mar). Estas especies poseen una diversidad de colores de floración, un desarrollo máximo pequeño, siendo algunas importantes cobertoras con escasos requerimientos de riego. Todas estas plantas son vivaces, responden muy bien a un cultivo vertical y todas las semillas se comercializan de forma sencilla.



FIGURA 5: Especies vegetales seleccionadas

A fin de conseguir un correcto desarrollo de las plantas, las raíces tienen que estar en el interior de un sustrato que contenga los nutrientes adecuados para su subsistencia. Dentro del gavión se coloca una celda de drenaje tipo *Atlantis* (sustituible por caja metálica) que posee concavidades; permitiendo la introducción de humus, polímeros hidroabsorbentes de sales potásicas y vermiculita. La celda drenante se envuelve con un geotextil permeable al paso de agua y que retiene las partículas de sustrato. Además, es necesario colocar un aislamiento imputrescible, considerando el contacto con la humedad generada por las plantas por evapotranspiración y el mismo riego.

Los gaviones se disponen sobre la fachada existente a través de una estructura auxiliar. Sobre la estructura porticada de las edificaciones se anclan químicamente unos perfiles verticales omega de acero galvanizado. El vínculo de los gaviones con la estructura se lleva a cabo mediante anclajes angulares.

Al funcionar de forma similar a una fachada ventilada, se incrementa el aislamiento de las edificaciones eliminando puentes térmicos, así como, los problemas de condensaciones, obteniendo de esta manera un excelente comportamiento térmico.

Al conformar un cerramiento protector exterior y otro interior, se evita el deterioro del mismo a causa de los rayos ultravioletas o el ácido carbónico, evitando la aparición de casos patológicos comunes en sistemas constructivos tradicionales.

Paneles vegetados en caja metálica

La fachada de paneles vegetados desmontable en caja metálica es un sistema constructivo diseñado de forma modular. Los paneles vegetales se conciben como módulos de 60 x 60 cm en cajas metálicas con base de poliestireno extruido. Estos módulos componen la fachada de modo que fácilmente pueda ser desmontable a través de una sencilla estructura metálica de anclaje, complementada por un soporte vertical alojado en el cerramiento. A fin de optimizar energéticamente la fachada, una cámara de aire de 80 mm se incluye entre los paneles vegetales y la capa de aislante fijada en la superficie más exterior del muro.

Las especies vegetales incorporadas requieren de un elemento de soporte que tenga en su interior los nutrientes y elementos necesarios que propicien su crecimiento. Es por esta razón que se emplea una caja metálica, cuyo interior alberga el sustrato envuelto en un geotextil que permita el paso del agua y, al mismo tiempo, evite la pérdida del mismo. Las cajas metálicas presentan un tratamiento anticorrosivo por su exposición a la humedad generada por la evaporación del agua por parte de las plantas y del propio riego.

El vínculo entre los paneles vegetales y el edificio se realiza mediante una estructura portante de montantes y travesaños. En la parte posterior del panel vegetal se colocan unos anclajes que se enganchan a una estructura horizontal secundaria dispuesta sobre la perfilería vertical. Las uniones tienen capacidad suficiente como para soportar los efectos del viento u otros posibles impactos. Esta estructura portante permite despegar los paneles vegetados del cerramiento interior creando de esta manera una cámara de aire.

Durante los meses fríos, se produce una menor dispersión del calor; mientras que en verano, la corriente que se produce en la cámara evita que se genere un recalentamiento del cerramiento y, por consiguiente, un aumento de la temperatura interior. Además, se dispone un aislamiento por detrás de los paneles que optimiza el aprovechamiento de la masa portante, evita humedades y reduce las condensaciones intersticiales evitando la aparición de puentes térmicos.

A fin de evitar un exceso de consumo de agua en el mantenimiento de la vegetación, las especies vegetales que se aplican son principalmente autóctonas. Se ha estudiado, en este prototipo de fachada,

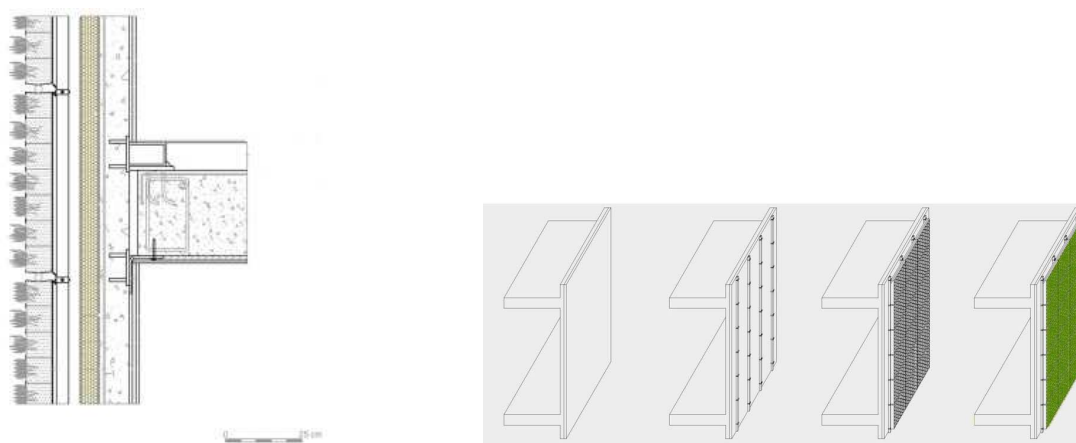


FIGURA 6: Sección vertical del sistema de paneles y despiece de los componentes

plantas de tipo *Sedum*, se trata de una especie que sobrevive con poco agua. El riego es por goteo y está constituido por tuberías de 16 mm ubicadas en la parte superior de cada panel vegetal.

A fin de analizar el comportamiento energético de este tipo de fachada vegetal, el sistema se ha montado en un edificio experimental en Colmenar Viejo (Madrid) perteneciente a la empresa *Intemper Española S.A.* La monitorización comenzó en noviembre de 2008, tendrá una duración de tres años y se articulará en diferentes etapas llevadas a cabo por investigadores del grupo ABIO. Para determinar el grado de ahorro energético que la fachada vegetal proporciona al edificio, el proyecto de investigación consiste en comparar un prototipo de fachada vegetal en caja metálica con otra fachada idéntica a ésta que prescindiera de la última capa de vegetación. Las dos fachadas están monitorizadas en todas sus capas por sensores fijos (sondas de contacto, sondas de ambiente) que toman valores de temperatura. De esta forma se registran las temperaturas que se producen en las capas de cada cerramiento de los módulos y se analizan los consumos.

Paneles vegetados en celdas drenantes

Los paneles vegetados en celdas drenantes están formados por celdas *Atlantis* de polipropileno, con una porosidad del 90%. Las oquedades se rellenan con un sustrato previamente estudiado. El conjunto se envuelve con fieltro de lana de 2 mm de espesor y $0,55 \text{ g/cm}^3$ de densidad, obteniendo un paquete compacto colocado en paralelo a la fachada, de forma que la cara amplia del mismo quede vista. Sobre esta cara se practican incisiones en el fieltro para introducir las especies vegetales, posteriormente irrigadas por goteo.

El sistema de irrigación es automático mediante conductos de goteo. El riego por goteo consiste en aplicar pequeñas cantidades de agua en zonas localizadas, en este caso, sobre cada panel. Se compone de tuberías de distribución de polipropileno (tubos gotero 16 mm de diámetro); de las que, mediante conexiones tipo injerto, se obtienen salidas de microtubo de 4 mm, ubicados en la parte superior de cada panel vegetal. En estos microtubos se instalan goteros montados sobre estaca de 12 cm que funcionan de manera óptima a una presión de 1,5 bar. El agua sobrante se recoge en la parte inferior, gracias a un canalón de chapa dispuesto de forma que se pueda recircular el agua para riego.

Fachadas translúcidas

Las fachadas translúcidas estudiadas son dos: un cerramiento vertical concebido como un invernadero extraplano con un elemento vegetal intermedio y una protección exterior móvil para huecos de fachada que incorpora una planta trepadora.

Fachada vegetal invernadero

La fachada vegetal invernadero es un sistema constructivo que funciona como ventilación higiénica, ventilación térmica y protección solar. Además de actuar como un material de construcción, la incorporación de elementos vegetales al cerramiento de fachada ofrece una respuesta térmica variable según las

condiciones climáticas exteriores, constituyendo el conjunto un sistema clave en la optimización de las cualidades de confort del edificio.

La estrategia consiste en un cerramiento de fachada concebido como un invernadero extraplano que incluye un subsistema constructivo vegetal. Tres capas o subsistemas correlativos lo componen mediando entre el interior y el exterior:

- **Capa interior.** Ventana corredera de dos hojas modelo *Technal* (1.420 x 1.410 mm) de carpintería metálica y acristalamiento doble de vidrio (espesor 14 mm) con cámara de aire (espesor 12 mm).
- **Capa intermedia vegetal.** Sistema vegetal vertical compuesto por jardinera metálica (1,50 x 0,50 x 0,40 m) con sistema de riego automático por inmersión y control por temporizador, cableado de acero de desarrollo helicoidal como soporte de especies vegetales y bastidor metálico con ensamblajes mediante tornillería metálica. A modo de fachada pre-vegetada, la vegetación se desarrolla en cajas conformadas con placas celulares rígidas de polipropileno (reciclado y reutilizable) donde se aloja el sustrato.
- **Capa exterior.** Cerramiento modelo *Technal* basado en un entramado simple de lamas basculantes de policarbonato en masa de 5 mm de vidrio, adosadas a un bastidor de aluminio. Las lamas son practicables, a través de un sistema domótico que se activa desde el interior de la vivienda.

En verano, la densidad de la vegetación consigue una obstrucción solar determinada con su consecuente ahorro en refrigeración. En invierno, el aspecto de la capa intermedia vegetal mutaría con la caída de las hojas, permitiendo la entrada máxima de radiación solar, junto a una mejora de las prestaciones térmicas del ambiente interior.

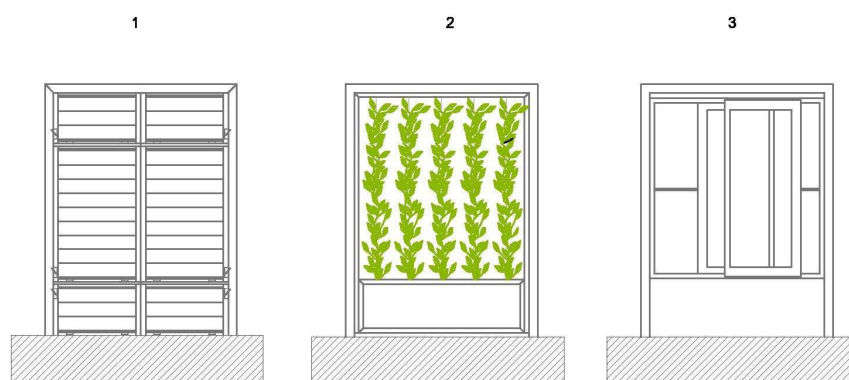


FIGURA 7: Alzado con las tres capas

Durante el periodo estival, el aire exterior atraviesa la lámina vegetal húmeda, enfriando unos grados el ambiente interior. En invierno, el conjunto del sistema constituye un invernadero para la vegetación, calentando el flujo de aire de forma pasiva, suponiendo en ambos casos, un ahorro energético. Además, la capa exterior regula las condiciones térmicas del invernadero, limitando el flujo de aire y la humedad según las necesidades.

La facilidad de puesta en obra y de montaje del sistema lo convierte en un cerramiento ligero adecuado para proyectos de rehabilitación y Viviendas de Protección Oficial. Su construcción y manipulación son rápidas y económicas, realizándose en obra seca.

El sistema de fachada se ha montado en un edificio experimental de la empresa *Intemper Española S.A.* Los investigadores del grupo ABIO están monitorizando y comparando los efectos de dos prototipos de fachada traslúcida, prescindiendo uno de ellos de la capa intermedia vegetal. Se han instalado sondas de temperatura y luxómetros, además de dos módulos adiabáticos adosados a las fachadas. A través de la monitorización se pretende obtener y registrar los datos de temperatura que se produzcan en las distintas capas de cada cerramiento, desde el exterior hasta el interior. También se desea obtener y registrar la intensidad lumínica en el interior de los dos módulos.

Panel deslizante vegetal

La estrategia del panel deslizante vegetal constituye una protección solar móvil para huecos de fachada que incorpora un soporte para especies trepadoras, preferentemente de hoja caduca. El principal objetivo

de la estrategia es lograr que las plantas incorporadas al panel actúen como protección contra las ganancias excesivas de calor provocadas por el sol. La vegetación obstruye, filtra y refleja la radiación. Las ganancias de calor se reducen tanto por radiación como por conducción, ya que se evita el impacto de la radiación directa y, al mismo tiempo desciende la temperatura del aire adyacente al muro.

El soporte para la vegetación consiste en una jardinera-maceta instalada en la parte inferior del panel, solidaria al mismo de forma que deslicen en un solo movimiento. La jardinera alberga el sustrato de las diferentes especies vegetales viables según el clima, orientación o las características consideradas a generar en la fachada. Un sistema de cables helicoidales, atravesando el marco deslizante, posibilita el crecimiento de la trepadora de un modo tapizante. Para mantener la humedad del sustrato se propone un sistema de riego por capilaridad, por su facilidad de adaptación a un elemento móvil y por suponer un ahorro de agua considerable.

La maceta-jardinera se establece mediante el plegado de una chapa de aluminio anodizado de dimensiones totales. El tutorizado de las plantas se ejecuta con muelles a tracción, acabados en gancho para facilitar su colocación y con holgura y resistencia suficientes para permitir la sujeción de las plantas. El canalón-aljibe está conformado con chapa de aluminio anodizado, plegada de tal forma que minimice el efecto de la evaporación del agua que ha de alojar, al ser de sección abierta. La apertura de la sección ha de permitir la entrada de las mechas en el recorrido de deslizamiento del panel. El canalón recibe agua directamente de un grifo en la fachada que no obstruye el recorrido deslizante y acaba en una bajante conectada de tal modo que el nivel de agua en el canalón nunca rebose. Si existieran varios huecos de fachada en los que instalar el panel deslizante vegetal, es posible hacer que un mismo canalón-aljibe inferior sea compartido.

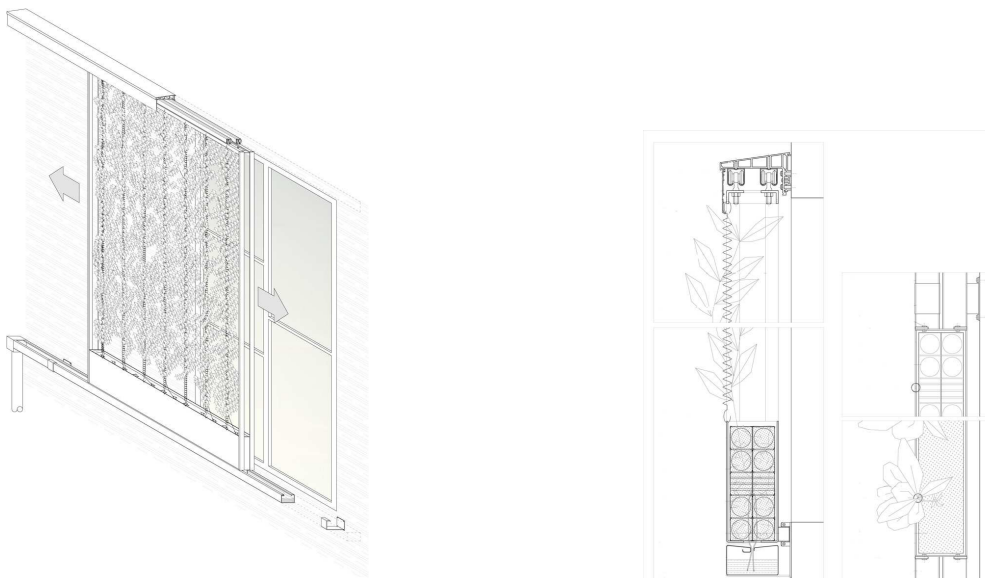


FIGURA 8: Funcionamiento y sección constructiva del panel vegetal

El soporte para el sustrato posibilita una sustitución y una colocación rápida y fácil de las especies vegetales traídas desde vivero. Para ello, se plantea un sistema de placas rígidas de polipropileno (reciclado y reciclable) celulares, rellenas con el sustrato y envueltas con un geotextil que lo retenga. El geotextil ha de ser lo suficientemente resistente como para sostener el sustrato, garantizando además una humedad óptima en condiciones de riego normales.

El sustrato ha de ser lo suficientemente neutro para el desarrollo de las plantas. Se garantiza la aireación del mismo mediante áridos expandidos o similares que prevengan una compactación excesiva y retengan el agua necesaria para periodos de verano.

La elección de la especie de planta trepadora varía en función del clima donde se ubique el edificio y de la orientación del propio panel deslizante. Tras considerar varias trepadoras de hoja caduca para el caso concreto de Madrid, se opta por aquellas que cumplen dos características principales:

- Desarrollo radicular pequeño. Considerando el interés que presenta este panel de deslizarse con un movimiento cómodo, esta condición va directamente relacionada con la dimensión de la jardinera incorporada al mismo, ya que las raíces tienden a ocupar el sustrato disponible. Así, para conseguir un espesor mínimo (alrededor de los 10 cm) se considera la maceta como un elemento corrido y

profundo (unos 25 cm). Estas dimensiones mínimas también garantizan una protección suficiente ante la radiación directa del sol, que de ser menores, supondría un calentamiento en exceso de las raíces de las plantas.

- Crecimiento controlado o control limitado de su desarrollo en determinado volumen alcanzado. El mantenimiento mínimo es un valor en un sistema industrializado a colocar en viviendas de carácter social. Por ello, interesan especies trepadoras que no necesiten podas o trabajos adicionales incómodos para los ocupantes de la vivienda. Es necesario asegurar un desarrollo máximo de la capacidad tapizante de la especie vegetal seleccionada.

Con base a estos criterios, se considera adecuado el uso de especies como la hortensia trepadora (*hydrangea petiolaris*), los jazmines amarillo y silvestre (*jasminum nudiflorum* y *jasminum fruticans*) o las madreselvas de bosque (*lonicera periclymenum* y *lonicera etrusca*). En orientaciones norte no es tan acertada la colocación de especies de hoja caduca, siendo propuestas en estos casos especies perennes con reservas como la hiedra (*hedera helix*) de hoja pequeña.

La aplicación del panel deslizante vegetal es posible en cualquier edificio, preferentemente en aquellos con aberturas al exterior en forma de huecos de fachada, siempre que ésta posibilite el cuelgue del peso del panel y la colocación de las guías en la misma. También es aplicable a particiones móviles exteriores e interiores, en las que se ha de prever el cuelgue respecto de otros elementos constructivos o incluso su autonomía estructural mediante ruedas inferiores, en lugar de estar colocadas en la parte superior del panel.

Los requerimientos aceptables de luz según la especie vegetal, el mantenimiento futuro y el control del crecimiento de la vegetación por ambas caras del panel son los puntos claves para la ubicación del mismo. El rendimiento general del sistema mejora en aquellos edificios que cuentan con un sistema centralizado de gestión de aguas residuales para riego de plantas y un lugar accesible de colocación del panel deslizante que facilite su mantenimiento: sustitución de plantas, podas, recogida de hojas secas y frutos, etc.

Con leves modificaciones, el sistema es aplicable a paneles exentos en jardines y espacios públicos. Además, su colocación es posible en superficies horizontales, tales como lucernarios y cubiertas móviles, siendo de mayor repercusión los efectos de la obstrucción solar.

Efectos medioambientales de la vegetación

Entre los beneficios que implica la utilización de envolventes vegetales como los descritos, se pueden mencionar los siguientes:

- Mejora de la calidad del aire. Las estrategias se comportan como filtros verdes que fijan las partículas contaminantes, actuando como sumideros de CO₂ y transformándolo en carbono orgánico.
- Beneficios térmicos:
 - Reducción de la temperatura y de la isla de calor.
 - Sombreamiento de los espacios interiores, aislamiento e inercia térmica (el sustrato amortigua la oscilación térmica en cubierta).
- Reducción del ruido ambiental.
- Recuperación de espacios autóctonos.
- Sistemas con posibilidades de producción de huertos urbanos.
- Influencia positiva en el equilibrio psicosomático de los ciudadanos.

El ahorro energético conseguido es favorecido por mecanismos como la intercepción de la radiación solar, el enfriamiento evaporativo y el aislamiento. Sin embargo, existen parámetros condicionantes como los citados a continuación: índice del área foliar, humedad y grosor del sustrato, densidad del follaje, color y textura de las hojas, condiciones y adversidades climáticas del lugar y comportamiento de la especie en función de la altura.

Las superficies verdes mejoran las condiciones ambientales de los polos urbanos; debido a que favorecen la aportación de oxígeno mediante el proceso de fotosíntesis, suavizan las temperaturas extremas y reducen la contaminación atmosférica. Los efectos de la fotosíntesis son mayores cuanto más significativa es la superficie foliar. Al mismo tiempo, cuanto mayor es la masa foliar, el volumen de retención de contaminantes es superior.

En cuanto a la regulación de la humedad y de la temperatura, los elementos vegetales cumplen un papel importante. Si las superficies de los edificios y pavimentos están constituidas por materiales lisos, como el hormigón, la radiación solar es absorbida más fácilmente, aumentando de esta manera la temperatura en las ciudades. A esto se suma un incremento de sustancias nocivas, derivadas de la utilización de combustibles fósiles y medios mecánicos para el acondicionamiento de los edificios. La consecuencia más directa de estas circunstancias insostenibles es la modificación del microclima urbano junto a los efectos derivados de la *isla térmica*. Esto provoca serias repercusiones en verano y en invierno. La capa de contaminantes evita el enfriamiento nocturno de las zonas más densas. Surgen gradientes entre el centro y la periferia. En invierno se atemperan las temperaturas extremas y en verano se genera un recalentamiento de las calles y espacios, provocando un microclima sofocante.

El sombreado que genera la vegetación evita que materiales como la piedra o el hormigón absorban la radiación y la cedan al medio en forma de energía calorífica. También se incrementa la humedad relativa como consecuencia de la evaporación. Las plantas pierden agua hacia el medio. En ese cambio de fase se utiliza el calor del aire del entorno, de modo que, además de aumentar la humedad ambiental, se disminuye la temperatura del aire.

La presencia de vegetación en entornos cálidos puede refrescar la temperatura exterior en 5 °C. Con una reducción de 5°C se calcula cerca de un 50 % en ahorros de refrigeración, disminuyendo el incremento de temperatura en las ciudades por el efecto de la isla de calor. En la cubierta, las especies vegetales aumentan el aislamiento térmico; ya que la vegetación y el sustrato con el aljibe evitan que se generen fluctuaciones en la temperatura interior. Esto se debe tanto a la propiedad de las especies vegetales de reflejar los rayos solares como a la inercia térmica que aporta el sustrato y a la capacidad del aljibe para permitir que no se generen pérdidas energéticas cuando disminuyen las temperaturas exteriores.

La reducción del ruido ambiental es una característica del sistema de gaviones, gracias a la utilización de materiales pétreos en la composición de los módulos. Referente al resto de soluciones expuestas, el nivel de absorción acústica depende de la superficie foliar.

La aplicación de cubiertas vegetales supone en cierto modo recuperar el terreno natural perdido por la edificación, pudiendo proyectarse como terrazas accesibles que conviertan al cerramiento horizontal en una superficie útil.

El hecho de que los ciudadanos puedan tener contacto directo con elementos vegetales integrados en espacios públicos, siendo partícipes de su crecimiento, no sólo generaría beneficios medioambientales, sino que también cumpliría una función didáctica a nivel social. De la concepción de huerto o jardín urbanos, se posibilita la participación e implicación directa de los propios ciudadanos en su mantenimiento. El panel deslizante también se plantea como pequeño huerto a través del uso de especies como las tomateras (*solanum lycopersicum*) tipo *cherry*, o incluso frutales como el membrillero de flor (*chaenomeles japonica*) que puede mantenerse fácilmente dentro de los límites del panel con un mayor mantenimiento y ciertas operaciones de poda.

Referente al aspecto psicológico mencionado, se han de considerar las sensaciones y efectos positivos producidos por la presencia de elementos vegetales. La vegetación desempeña un lugar preponderante en el medio por sus características físicas y estructurales: forma, textura del follaje, tonos, brillos, movimiento de las hojas, colores, etc.

Las propuestas de envolvente vegetal aquí investigadas se encuentran actualmente pendientes de simulación en edificios prototipo, a fin de obtener resultados estimativos de los ahorros energéticos que se obtendrían si se aplicaran como posibles soluciones constructivas. Actualmente, como se mencionó anteriormente, algunas de estas estrategias sostenibles, como es el caso de la fachada vegetal opaca en caja metálica y la fachada vegetal translúcida, están siendo monitorizadas en demostradores para determinar su comportamiento tanto en verano como en invierno.

Conclusiones

Los sistemas propuestos de envolventes horizontales y verticales se conciben como módulos conformados por una serie de elementos disponibles en el mercado. Un diseño específico, como es el que fue expuesto, supone una optimización de los tiempos de ejecución en obra. En caso de reposición de cualquier módulo, el carácter industrializado de estas soluciones constructivas permite que el proceso se lleve a cabo sin perjudicar a los restantes módulos que integran el cerramiento. El montaje y el mantenimiento no requieren gastos adicionales, simplemente es recomendable seleccionar especies autóctonas con exigencias mínimas de conservación.

Diversos estudios sobre el comportamiento de cubiertas han sido ya desarrollados. Sin embargo, en lo referido a los estudios sobre fachadas vegetales, aún queda un amplio campo por investigar, más aún si se considera el potencial tan significativo de estos sistemas constructivos, considerando su mayor superficie

de ocupación en edificios en altura que un cerramiento horizontal. Es importante ampliar su aplicación a la restauración, tanto de edificios como de espacios exteriores, y llevar a cabo estudios referidos al coste-beneficio de este tipo de soluciones.

Las envolventes vegetales constituyen un sistema de protección de las edificaciones; evitando en verano el sobrecalentamiento de los espacios interiores y en invierno, las pérdidas energéticas. Al mismo tiempo, se consigue un descenso de la temperatura de las brisas próximas a los cerramientos, además de aumentar la humedad ambiental debido al proceso de evapotranspiración que realizan las plantas.

La incorporación de vegetación en el edificio y su entorno, lo convierte en un elemento vivo dentro de la ciudad, donde la presencia de elementos vegetales se ve reducida a unos pocos espacios. De esta forma se genera una serie de impactos positivos para su entorno y sus ocupantes.

Es de sumo interés incrementar las superficies verdes con nuevas tecnologías en el campo de la bioclimática, para mejorar de este modo el microclima urbano y proyectar ciudades más permeables y saludables.

Estas protecciones vegetales pasivas pueden aplicarse en el campo de la rehabilitación de edificios o en obras de nueva planta, produciendo una reducción en las necesidades de acondicionamiento interior. También son adecuados para diversas tipologías; ya sea en edificios residenciales, tanto viviendas colectivas como unifamiliares, centros comerciales, deportivos, culturales, educativos, centros de congresos, oficinas y hospitales.

Un jardín vertical u horizontal brinda múltiples posibilidades de diseño, tanto de carácter morfológico como estético. En conjunto, constituye un elemento pasivo de acondicionamiento que proporciona un ahorro energético a la edificación, funcionando como un instrumento de mejora del medio ambiente y del efecto invernadero en las ciudades.

Referencias bibliográficas

AKBARI, H.

1997 «Peak power and cooling energy savings of shade trees»
Energy and Buildings, volumen 25, Great Britain: Elsevier Science Ltd.

AKBARI, H.

2001 «Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas»
Solar energy, volumen 70, Great Britain: Elsevier Science Ltd.

BLANC, PATRICK

2008 *Le mur végétal de la nature à la ville*.
France: Michel Lafon.

ELEFThERIA, ALEXANDRIA Y JONES, PHIL

2008 «Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates»
Building and Environment, Great Britain: Elsevier Science Ltd.

FALCÓN, ANTONI

2007 *Espacios verdes para una ciudad sostenible: planificación, proyecto, mantenimiento y gestión*.
Barcelona: Gustavo Gili.

FERNÁNDEZ CASAS, JAVIER

1982 *Plantas silvestres de la Península Ibérica (Rupícolas)*.
Madrid: H. Blume

FRANCOIS, EDOUARD

2002 *L'immeuble qui pousse*.
France: Jean Michel place/architecture.

LEMAIRE, FRANCIS

2005 *Cultivos en macetas y contenedores: Principios agronómicos y aplicaciones*.
Madrid: Mundi-Prensa.

LOZANO, MATÍAS

1993 *Cultivos sin suelo: Hortalizas en clima mediterráneo*.
Reus: Ediciones de Horticultura.

LLURBA, M.

1997 «Parámetros a tener en cuenta en los sustratos»
Revista Horticultura, número 125.

NEILA GONZÁLEZ, JAVIER.

2004 *Arquitectura Bioclimática en un entorno sostenible.*

Madrid: Munilla-Lería.

RODRÍGUEZ DELFÍN, ALFREDO

2001 *Manual Práctico de Hidroponía.*

Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina, ISBN 84-591-1083-4.

SUQUILANDA, M.

1996 *Serie Agricultura Orgánica.*

Quito: UPS Ediciones.

URRESTRARAZU GAVILÁN, MIGUEL

1997 *Tratado de cultivo sin suelo.*

Madrid: Mundi-Prensa, se cita la tercera edición de 2004.