

Diseño y análisis de dos tipologías estructurales para su utilización como estructuras auxiliares en el diseño de jardines

Design and analysis of two structural form for use like auxiliary structures in garden's design

J. A. López^(*), P. Mellado^(**), A. J. Callejón^(***), J. M. Vargas^(****)

RESUMEN

En jardinería en general y más en particular en el diseño de jardines y parques urbanos, se plantea la necesidad de introducir estructuras auxiliares útiles para el cobijo de sus usuarios frente a la radiación solar en determinados momentos del día. Durante mucho tiempo, se han reproducido conjuntos apergolados clásicos en todas nuestras zonas ajardinadas, que en caso contrario se han revelado como elementos excesivamente caros y poco funcionales. En el presente artículo se pretende exponer la posibilidad de ejecutar conjuntos vanguardistas y funcionales con un coste mínimo y un periodo de ejecución breve. Se ha analizado un conjunto de pérgolas diseñado para ser construido dentro del Campus de la Universidad de Almería, con la intención de demostrar que respetando la normativa sobre edificación se pueden conseguir soluciones novedosas en las que se integren usos diversos, a menudo no compatibles bajo otras concepciones, con un coste contenido. Dentro de este conjunto se distinguen dos módulos, uno, de corte más clásico, rectangular, con una configuración que permite un funcionamiento estructural equilibrado que se traduce en la utilización de perfiles metálicos de no mucha envergadura; y otro, más novedoso, octogonal, pero que bajo las mismas premisas anteriores, se ha resuelto a través de un profundo análisis para establecer la geometría más adecuada, determinar su comportamiento, cálculo, dimensionado y resolución de los problemas de ejecución y montaje.

168-2

Palabras clave: pérgolas, estructuras, construcciones metálicas, diseño de jardines.

SUMMARY

In gardening and more particularly in the design of gardens and urban parks, nowadays exists the necessity to introduce useful auxiliary structures for the shelter of the users to the solar radiation, at certain moments of the day. During long time, joints of classic roof garden have reproduced in all our landscaped zones, that otherwise have been revealed like excessively expensive and not very functional elements. In the present article we are tried to expose the possibility of executing modern and functional sets with a minimum cost and a very brief period of execution. We are analyzed a set of roof garden designed to be constructed within the Campus of the University of Almeria, with the intention to demonstrate that respecting the norm on construction, novel solutions in which diverse uses are integrated, often noncompatible under other conceptions, can be obtained, with a contained cost. Inside this group two modules are distinguished, one more classic, rectangular, with a configuration that allows a structural operation balanced that are translated in the use of metallic profiles of little size, and other more novel, octogonal, but that under the same previous premises, it has been solved through a deep analysis to establish the most suitable geometry, to determine its behavior, calculation, determine the proportions and resolution of the problems of execution and assembly.

Keywords: roof garden, structures, steel construction, garden's design.

* Ingeniero Aeronáutico. Dpto. de Ingeniería Rural. Universidad de Almería (Almería, España)

** Escultor. Dpto. de Ingeniería Rural. Universidad de Almería (Almería, España)

*** Dr. Ingeniero Agrónomo. Dpto. de Ingeniería Rural. Universidad de Almería (Almería, España)

**** Ingeniero Agrónomo. Dpto. de Ingeniería Rural. Universidad de Almería (Almería, España)

1. INTRODUCCIÓN

Desde sus orígenes el ser humano pudo distinguir los espacios que le eran más favorables, áreas en las que el agua, la vegetación y la fauna eran habituales y variadas. En esta primera etapa el hombre se enfrenta a la naturaleza mediante sortilegios y conjuros, es la conocida como Etapa Mágica. A partir de este momento, la magia se solapa con la religión y esta última a su vez cede espacio ante la ciencia; el jardín propio de cada una de estas etapas actúa como marco espacial en el que se desarrollan dichas actividades (1) (6) (7) (9).

Los jardines, a través del tiempo, han ido adquiriendo importancia en el paisaje urbano de nuestros pueblos y ciudades, incorporando estructuras auxiliares y construcciones que maximizan aún más los beneficios que otorga la estancia del ser humano en las zonas ajardinadas. Estos elementos son cerramientos, estanques, fuentes, bancos, construcciones de tipo sagrado, emparrados, setos, muros, pérgolas, etc. La pérgola es uno de los elementos más característicos de las grandes zonas ajardinadas públicas, y quizás su configuración estructural haya quedado un tanto anclada en la jardinería clásica, no adaptándose como otros elementos auxiliares a los jardines y parques contemporáneos, donde los perfiles metálicos y el hormigón eclipsan en parte a las especies vegetales allí presentes.

Basándose en entrevistas con jardineros y en el análisis de dos populares revistas de jardinería, Power (2005) concluye que la jardinería es un proceso dinámico de colaboración, negociación, reto y competencia, al describir, ésta, las relaciones humanas con las plantas del jardín y sus sensaciones (37).

En la actualidad existe gran literatura que describe la importancia de los jardines familiares para la prevención del estrés, el esparcimiento y temas personales y de identidad social (43) (Syme *et al.*, 2004). Stevens (1995) promueve el bienestar con la concepción de jardines en un centro de rehabilitación de Knoxville (Tennessee) (42), de igual forma Hammatt (2002) (18) y Pfeffer *et al.* (2007) (36), analizan el diseño y comportamiento de una pérgola ajardinada para los pacientes y sus familias en el hospital para niños de Sant Louis y para un centro geriátrico, respectivamente.

Ciertos edificios emblemáticos están diseñados basándose en los jardines en las azoteas o apergolados (Steadman, 2000) (40), tales como la reserva federal bancaria de Boston (Levinson, 1992) (30), Museo Metropolitano de Arte de Jardín sobre techos de New York (Anon, 1996) (11), un restaurante gourmet en

Lyon (Kahn, 1992) (21) o las oficinas de la calle Saint Martin de Lausanne (Anon, 1974) (10). Por otro lado, las pérgolas ajardinadas han despertado interés y han sido inspiración de famosos poemas (Caley, 2003) (13), además de servir para otros atributos publicitarios (Elon, 1999) (17). La jardinería ha llegado hasta los paisajes marinos, sugiriendo Rinkevich (2005) (39) que la restauración del paisaje y la restauración genética son cuestiones importantes a estudiar en el paisaje de coral. El aumento de las preocupaciones ecológicas en el diseño de edificios, ha hecho que arquitectos en Singapur comiencen a diseñar edificios más verdes, entendiéndose, con más zonas ajardinadas, aprovechando los techos de los mismos (Hien *et al.*, 2007) (20). En sus investigaciones han conseguido evitar, con vegetación en las cubiertas, hasta la transmisión de un 60% del calor de cubierta sin vegetación. También, Hien *et al.* (2007) (20) han conseguido mayor confort en edificios con jardín en cubierta que otros edificios sin jardín en cubierta.

Onmura *et al.* (2001) (34) estudiaron el enfriamiento pasivo provocado por la colocación de césped en los tejados de los edificios, comprobando que durante el verano la cantidad de calor de las habitaciones se redujo considerablemente (50% de flujo de calor). Estos datos validaron, a su vez, un modelo matemático de predicción. Igualmente, Neila *et al.* (2008) (48) concluyeron que el uso de una cubierta vegetal sobre el techo de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid mejoró el ahorro de energía, la disminución del agua de riego y el bienestar ambiental del entorno. Wong *et al.* (2003) (47), concluyeron que la instalación de jardines en la azotea de edificios puede repercutir en un ahorro en el consumo de energía anual entre 0,6 y el 14,5%. Sus resultados, también revelaron que el aumento del espesor del suelo del jardín y el uso de especies arbustivas mejoraría los resultados de manera significativa.

Kumar y Kaushik (2005) (28) realizaron un modelo matemático para evaluar el potencial de refrigeración de las zonas ajardinadas sobre los techos de los edificios expuestos a energía solar. Las pérgolas ajardinadas son como el aire acondicionado de forma natural (Kovac, 2000) (25). Teniendo en cuenta las limitaciones de espacio, las pérgolas ajardinadas se han convertido en una prometedora y estable elección para mejorar el confort, sobre todo por carga térmica de los edificios. No obstante, una cuestión crítica para los jardines en alto es la liberación de contaminantes al suelo urbano.

El problema no sólo lo causan las partículas disueltas en agua, sino también la liberación de restos de fertilizantes (Kim *et al.*, 2006)

(24); no obstante, Steinberger (1998) (41) ya adelantó este hecho al evaluar los riesgos de accidentes en las zonas ajardinadas de los techos de las edificios, detectando, entre otros riesgos, materiales peligrosos en las aguas de lixiviación de los mismos. Kim *et al.* (2005b) (24) analizaron las aguas de percolación de los jardines de pérgolas para intentar reducir al máximo la contaminación de dichas aguas, desarrollando diversos subsistemas de tratamiento de las aguas.

El mantenimiento de los sistemas de vegetación en las pérgolas ajardinadas tiene que ser cuidadosamente diseñado con el fin de evitar la contaminación del agua por fertilizantes muy solubles (Berndtsson *et al.*, 2006) (12). Algunos materiales, como la bauxita, reducen la concentración de metales pesados en el sustrato y como consecuencia en el lixiviado (Kim *et al.*, 2006) (22).

Dietz y Clausen (2006) (16), lograron retener, pero no disminuir la concentración de contaminantes en una pérgola ajardinada, realizando una zona saturada a 2,54 cm del final del sustrato.

Ciamberlini *et al.* (2003) (14) describe como ventaja que un pequeño grupo de placas solares se pueden colocar en pérgolas ajardinadas, repisas de ventana, al aire libre en el campo y en general en todas las zonas expuestas a la luz solar para obtener pequeñas cantidades de energía. Rahim (2001) (38), no aprecia viabilidad para la desalinización de aguas en azoteas ajardinadas mediante pequeños módulos de placas solares.

Kronaveter *et al.* (2001) (27), llegaron a la conclusión de que la conexión de desagües del techo de los edificios de una urbanización a un jardín favorece la disminución de procesos de erosión.

Syme *et al.* (2004) (43) investigaron la relación del uso del agua en el jardín con los estilos de vida de las personas a través de 397 encuestas; los resultados indicaron que la interacción entre las actitudes y valores socio-demográficos fueron mínimas sobre el uso del agua.

El creciente interés de la sociedad por el ahorro de recursos hídricos ha dado lugar a diferentes intentos de utilizar el agua de lluvia que discurre por las calles para diferentes usos, entre ellos la jardinería, mediante un filtrado y descontaminación previo (Kim *et al.* 2005a) (23).

Las pérgolas ajardinadas retienen un gran porcentaje de las precipitaciones naturales (aproximadamente un 63%) según el tipo de clima (Dietz, 2007) (15).

A pesar de los problemas económicos y de lixiviados, los beneficios estéticos y medioambientales de los jardines en los tejados, azoteas y/o pérgolas han sido reconocidos desde hace décadas. La cuantificación de estos beneficios no ha sido investigada profundamente en los EE.UU., mientras que en otros países, como Alemania y Canadá, si lo ha sido (Monterusso *et al.*, 2005) (31).

Ya más desde el punto de vista agronómico, en el año 1967 (45), Truex analizaba los jardines en altura, para posteriormente en 1969 (46), estudiar el comportamiento de ciertas coníferas sobre las pérgolas ajardinadas en época invernal.

Panayiotis *et al.* (2003) (35), investigaron la eficacia de cuatro sustratos para pérgolas ajardinadas. De todos ellos, la arcilla arenosa mezclada con turba y perlita (proporción 50-30-20 v/v) era menos pesada, consiguiendo los mismos efectos vegetativos sobre las plantas que otros sustratos más pesados.

Los suelos de jardines se agotan más rápidamente que los suelos de pastos naturales (Larre-Larrouy *et al.*, 2003) (29).

Monterusso *et al.* (2005) (31), analizaron dieciocho taxones de plantas nativas en una pérgola de la Universidad de Michigan para determinar que *Allium cernuum* L., *Coreopsis lanceolata* L., *Opuntia humifosa* Raf. y *Tradescantia ohiensis* L. son adecuadas para su uso en seco sobre la pérgola, además si se dispone de riego casi todas las plantas serían potencialmente cultivables.

El efecto de la profundidad de siembra en la nascencia, crecimiento y producción de *Abelmoschus esculentus* (L.) ha sido estudiado en una pérgola del Departamento de Protección de Cultivos y Biología Ambiental, de la Universidad de Ibadan en Nigeria.

Los resultados mostraron que la siembra a 4 y 5 cm de profundidad redujo significativamente la emergencia de plántulas (%) y causó una disminución significativa en el crecimiento vegetativo; también, se produjo una buena emergencia de plántulas entre 1, 2 y 3 cm de profundidad, siendo la siembra de 3 cm de profundidad la más óptima (Odeleye *et al.*, 2007) (33).

Krajcovicova (2007) demuestra que algunas plantas de jardín son más adaptables y resistentes a la sequía que otras, aunque su mantenimiento en pérgolas no sea el más apropiado (26).

Taga *et al.* (2001) (44) concluyeron que la pérdida de propagación de la comunicación, y como consecuencia la no uniformidad de

las ondas, en el Campus Universitario de Hokkaido fue debida a la masa arbolada existente.

Heukelbach *et al.* (2001) (19), asocian las aguas de los jardines estancadas a la propagación de mosquitos transmisores del dengue en Brasil, mientras que Montgomery y Ritchie (2002) (32), aconsejan tratar todas las pérgolas ajardinadas en épocas secas para evitar la propagación de mosquitos que transmiten el dengue en Australia.

El objetivo de este trabajo es analizar el diseño y ejecución, en el marco del estado de conocimiento actual de la materia, de dos tipologías estructurales para pérgolas ajardinadas: una primera, más clásica, consistente en una estructura rectangular con seis pilares que soportan un entramado plano de perfiles huecos dispuestos regularmente; y otra, más novedosa, consistente en una superposición de múltiples octaedros en altura soportados, a su vez, por cuatro pilares, todo ello intentando maximizar los beneficios del ajardinamiento de estas estructuras para sus usuarios y plantear soluciones integrables para las interacciones negativas con el medio ambiente y la actividad urbana.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Ubicación y condicionantes de la construcción

La construcción analizada en el presente documento se encuentra en el Campus de la Universidad de Almería, ubicado en la Carretera de Sacramento s/n de la localidad de La Cañada de San Urbano en Almería (España); concretamente en un espacio abierto situado en la fachada principal del recientemente edificado Aulario IV.

Los parámetros básicos de diseño de este conjunto de estructuras apergoladas fueron:

La parcela disponible presenta una planta sensiblemente rectangular.

- Dicha parcela se ubica de forma paralela a una calle principal del Campus, a menor altura que los edificios colindantes.
- Las alturas libres bajo las pérgolas deberían ser de, al menos, 3 m con el fin de crear ambientes agradables para los usuarios.
- El número de apoyos debe ser mínimo para facilitar la circulación de los usuarios.
- El aspecto del conjunto debe resultar innovador y vanguardista.

– La interconexión con la vegetación debe ser manifiesta, y no una mera cuestión de proximidad.

– El coste de construcción debe de ser competitivo con respecto a otras soluciones.

– El plazo de ejecución debe de ser breve.

– Sería conveniente que el conjunto permitiera el acceso, aunque fuese restringido, hacia zonas elevadas del mismo para proporcionarle la utilidad adicional de mirador.

2.2. Tipo de cálculo realizado

Se han realizado dos cálculos: un precálculo manual en el que se han simplificado las acciones de viento, por el excesivo número de hipótesis a considerar, y que nos ha dado una idea aproximada del funcionamiento de la estructura, lo que nos ha permitido retroalimentar el diseño tratando de optimizar al máximo dicho comportamiento ante las sollicitaciones consideradas; y, posteriormente, se ha realizado un cálculo definitivo mediante la utilización del programa informático METAL 3D de diseño y cálculo de estructuras tridimensionales de nudos y barras, con dimensionado y optimización de perfiles (simples y compuestos) y dimensionado de zapatas, placas de anclaje y encepados, desarrollado por CYPE Ingenieros, S.A.

La utilización de este programa informático y no de cualquier otro de cuantos hay en el mercado, muchos de ellos bastante más adecuados al ámbito científico -y no al profesional como éste-, radica en el hecho de que con este artículo se pretende incidir especialmente en la necesidad de cuidar el diseño de las estructuras auxiliares utilizadas en jardinería, un tanto olvidadas en el presente, y demostrar que con una herramienta informática no especialmente compleja es posible conseguir diseños y comportamientos estructurales bastante logrados.

2.3. Aplicabilidad del Código Técnico de la Edificación

Según el artículo 2.2 del Código Técnico de la Edificación (en adelante CTE), el mismo será aplicable a las obras de edificación de nueva construcción, excepto a aquellas construcciones de sencillez técnica y de escasa entidad constructiva, que no tengan carácter residencial o público, ya sea de forma eventual o permanente, que se desarrollen en una sola planta y no afecten a la seguridad de las personas.

En este sentido y dejando a un lado las matizaciones o consideraciones poco ob-

jetivas con respecto a la interpretación de este apartado, esta norma resulta totalmente aplicable a nuestra construcción, por cuanto que se trata de una estructura de uso público y que efectivamente puede llegar a comprometer la seguridad de los usuarios en caso de colapso.

Por lo tanto son directamente aplicables las exigencias básicas de seguridad estructural, a través de los distintos documentos básicos cuyo cumplimiento asegura la satisfacción de dichas exigencias.

2.4. Acciones consideradas en el cálculo

Con respecto a las acciones (1, 3, 4), éstas se pueden clasificar en tres grupos, a saber: acciones permanentes, acciones variables y acciones accidentales.

Con el ánimo de no ser profusos en la descripción de las mismas, tan sólo realizaremos algunas matizaciones al respecto que condicionan de una manera determinante el cálculo realizado.

Con respecto a las acciones variables, es decir, la sobrecarga de uso, acciones sobre barandillas y elementos divisorios, viento, térmica y nieve, remitimos al lector a la normativa correspondiente (4), el cual deberá tomar en consideración a la hora de comprender su aplicación, que se prevé el acceso peatonal a la pérgola octogonal por lo que debe considerarse como una zona de aglomeración.

El grupo de acciones accidentales se compone de las sísmicas, las debidas a la agresión térmica y las generadas por impactos. En este sentido, se ha considerado lo especificado en la normativa de construcción sismorresistente (3) y las acciones debidas a la agresión térmica, según el DB-SI (5); no habiéndose considerado impactos por no circular normalmente vehículos en las proximidades de la parcela.

Por último, con respecto a las acciones permanentes, es preciso considerar que la chapa metálica considerada para conformación de los maceteros presenta un grosor de 3 mm con lo que su peso será de 0,24 kN/m², que el peso de la vegetación es despreciable y que el tipo de sustrato, siguiendo los estudios previos realizados al respecto (35), se compondrá de arcilla arenosa mezclada con turba y perlita (proporción 50-30-20 v/v) por lo que su peso se ha calculado tal y como se detalla a continuación:

Para obtener el peso propio del sustrato se ha procedido a tomar una muestra del mismo con un peso inicial de 372 g, la cual a desecación presenta una masa (m_{sec}) de 300 g, y

tras saturarla a continuación con eter etílico (m_{ss}) 385 g, desplazando en este estado 220 g de disolvente (m_{dd}).

Teniendo en cuenta que la porosidad de un suelo se calcula como:

$$\theta = \frac{V_w + V_a}{V_T} = \frac{V_T + V_s}{V_T} \quad [1]$$

Siendo V_w el volumen de agua, V_a el volumen de aire, V_s el volumen de sólidos de la muestra y V_T el volumen total de la muestra.

Si dividimos por la densidad del fluido, obtenemos la siguiente expresión:

$$\theta = \frac{m_{ss} - m_{sec}}{m_{dd}} = \frac{m_{ds}}{m_{dd}} \quad [2]$$

Sustituyendo en esta expresión, obtenemos que nuestro sustrato presenta una porosidad del 38,64%.

La densidad real media para suelos minerales es de 2,65 t/m³ (8), por lo que teniendo en cuenta que la muestra desecada pesa 300 g, el volumen de suelo de la muestra es de 113,21 cm³.

De la expresión de la porosidad puede despejarse el valor del volumen ocupado por los poros del suelo, V_p , la siguiente:

$$V_p = \frac{\theta_v \cdot V_s}{1 - \theta_v} \quad [3]$$

Sustituyendo en la misma se obtiene que el volumen de poros de la muestra es de 71,29 cm³.

El volumen total de la muestra es, por lo tanto, de 184,50 cm³.

Con todos estos datos podemos calcular la densidad aparente en húmedo ρ_w^b mediante la siguiente expresión:

$$\rho_w^b = \frac{M_s + M_w}{V_T} \quad [4]$$

obteniendo un valor de 2,01 t/m³ (8,9).

2.5. Parámetros referentes a las barras considerados en cálculo

Con respecto a las longitudes de pandeo (L_k), para el caso de la pérgola rectangular se ha realizado el calculo utilizando el valor 1 para el coeficiente de pandeo pues se considera que se trata de barras empotradas pero cuyos extremos no tienen el desplazamiento coaccionado, mientras que para los pilares se ha utilizado el valor 2, decisión ésta bastante conservadora, ya que en realidad tan sólo

es así en el trayecto distal. En el caso de la octogonal se ha seguido el mismo criterio para los pilares pero no así para las barras contenidas en los octaedros que sí tienen el desplazamiento de sus extremos impedido, con lo que su longitud de pandeo es 0,5 L, aunque, no obstante, esta consideración cobra un marcado carácter irrelevante pues, como se verá más adelante, estas barras soportan principalmente esfuerzos de tracción siendo las compresiones despreciables (2).

Del mismo modo, se ha considerado el posible pandeo lateral de las barras, pues salvo las arriostradas por los cordones de soldadura de la jardinera rectangular, presentan el ala comprimida no arriostrada de forma continua, o bien de forma puntual, a distancias menores de 40 veces el radio de giro mínimo. Analizando el diagrama de momentos flectores se ha escogido un coeficiente de momentos de valor 1,56 (2).

Por último, se ha comprobado la flecha de las barras, limitándola a $L/350$, mientras que el desplome total de los pilares se limita a $1/500$ de la altura (5).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Solución adoptada

La solución más tradicional ante la necesidad de ejecutar espacios de descanso en zonas ajardinadas, suele ser la utilización de pérgolas planas de corte tradicional, frecuentemente de madera, dotadas, tan sólo eventualmente, de vegetación trepadora. Esta primera opción fue desechada por considerar que no aportaba ninguna innovación destacable, más aún al tratarse de un Campus en el que se auspician las edificaciones e instalaciones necesarias para la impartición de varias ingenierías.

Una segunda opción, también ampliamente reproducida en los parques y jardines de nuestras ciudades, es la consistente en realizar un estructura semicircular a modo de túnel, sobre la cual, de nuevo, se instalan plantas trepadoras. Ésta fue deshecha, al igual que en el caso anterior, por su escasa innovación y por su compleja ejecución y mantenimiento. Llegados a este punto, y tras descartar todo cuanto ya se hubiera visto o utilizado, ya se sabía lo que no se quería hacer: hacer algo convencional; y es así como se determinó el primer criterio de diseño: si lo convencional es que las plantas trepen, lo que hay que hacer es situarlas sobre la techumbre de la pérgola.

Steadman (2000) (40) avanzaba que ciertos edificios emblemáticos se basan en los jar-

dines de sus azoteas. Esta pérgola se basa en ajardinar la cubierta para crear, bajo ella, entre otras cosas, un lugar confortable, eso sí, para un campus universitario, y quién sabe si para llegar algún día a ser inspiración de poemas dado su emplazamiento, tal y como describe Caley (2003) (13). Lo cierto es que el hecho de tener vegetación en la cubierta lleva consigo la disminución de temperatura bajo ella, mejorando las condiciones climáticas y haciendo más agradable la estancia en los asientos. Este hecho, ha sido ya contrastado por Hien *et al.* (2007) (20), Onmura *et al.* (2001) (34), Kumar y Kaushik (2005) (28) y Kovac (2000) (25).

Con este diseño se consiguen mejorar las sensaciones positivas de los peatones que transitan por el campus universitario de Almería coincidiendo con Power (2005) (7), Syme *et al.* (2004) (43), Stevens (1995) (42), Amat (2002) (18) y Pfeffer *et al.* (2007) (36).

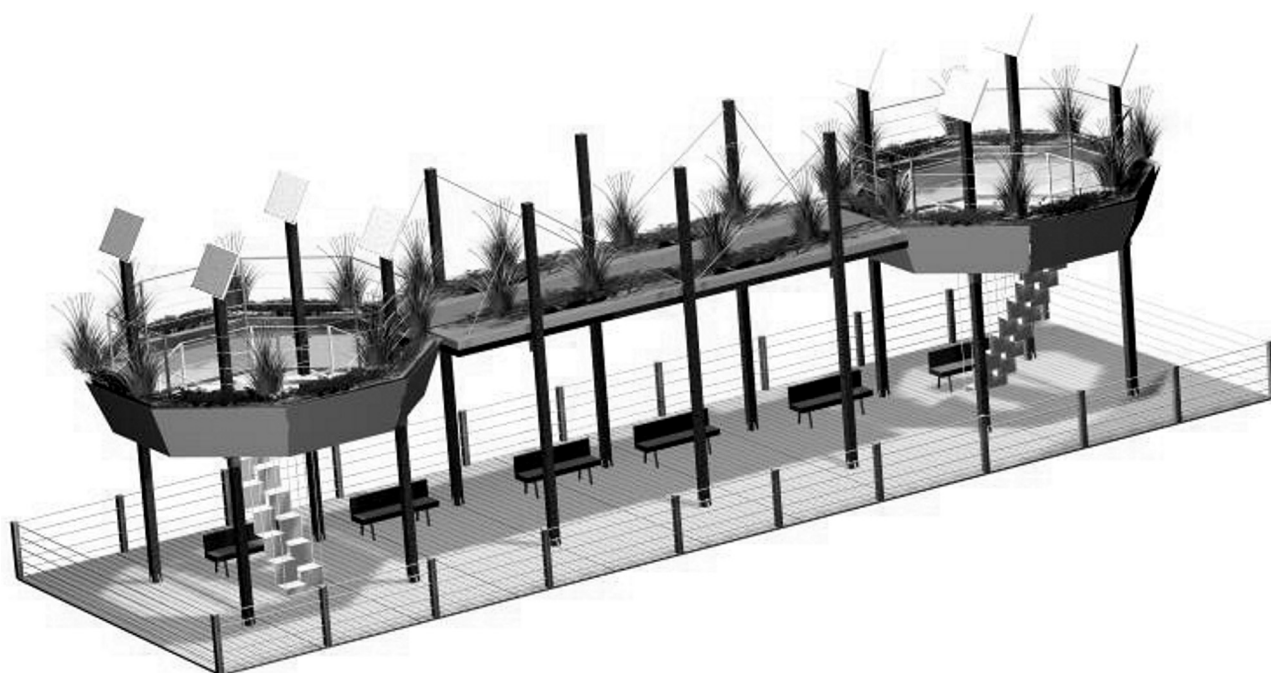
Respecto al material de fabricación, la madera se desechó en tanto que ha mantenido y mantiene una manifiesta relación con el tipo de estructuras con respecto de las que nos queríamos diferenciar.

Inmediatamente se pensó en utilizar piezas prefabricadas de hormigón armado, iniciativa ésta tomada en consideración a raíz del diseño del mencionado Aulario IV, junto al que se ejecutaría el conjunto, aunque su coste y su dilatado periodo de ejecución, comprometerían varias de las premisas impuestas.

De este modo se llegó a la conclusión de que el conjunto debería de construirse enteramente con perfiles metálicos huecos para conseguir un coste bajo y una ejecución técnica sencilla y rápida.

Una vez seleccionado el material que mejor se adaptaba a nuestras necesidades, tratamos de diseñar un conjunto singular para lo que aunamos una tipología clásica situada en el centro, de geometría rectangular, soportada por seis pilares, junto con dos réplicas situadas en los extremos de una configuración mucho más novedosa, consistente en una superposición de múltiples octaedros en altura soportados, a su vez, por cuatro pilares, y, del mismo modo, dotada de elementos estéticos y funcionales novedosos, incluidas las energías renovables, materializadas en una dotación de ocho placas solares fotovoltaicas que generarán la energía necesaria para el alumbrado nocturno (figura 1).

La justificación de la incorporación al conjunto de una parte central compuesta por una tipología de la que precisamente se quería huir, se justifica en que, de esta manera, es posible extraer conclusiones acerca de las verdaderas ventajas e inconvenientes de la misma con



1

respecto a la alternativa, tanto en lo relativo a su funcionamiento estructural como en lo relativo a su función como estructura utilizada para la mejora del bienestar humano.

La pérgola rectangular introduce como novedad, la colocación de dos jardineras de 9 m de longitud, 1 m de anchura y 0,3 m de altura, donde se cultivaran plantas adaptadas al clima de la zona. Y es aquí donde se ha querido aunar un diseño puramente arquitectónico con otro agronómico, en tanto que se consigue un resultado final vanguardista en el que, debido a su emplazamiento, en el futuro se podrán realizar ensayos de plantas ornamentales en condiciones semiáridas.

Por su parte, las octogonales disponen los cultivos sobre la pareja de octaedros superiores, permitiendo una mejor recogida y evacuación de los lixiviados y, a su vez, la circulación de personas a modo de mirador sobre la superficie que conforman los octaedros inferiores.

No obstante, estas circunstancias incrementan notablemente el peso del conjunto (peso propio y sobrecarga de uso), por lo que para conseguir una estabilidad estructural óptima se han seleccionado los tipos de perfiles más adecuados según las solicitaciones consideradas, y se ha diseñado una configuración espacial que, mediante la mayor simetría de cargas posible, confiera una gran solidez constructiva, con un peso contenido de acero. Las aguas de percolación que se producen como consecuencia del riego y aporte de nutrientes serán reconducidas mediante un drenaje, al igual que hizo Kronaveter et

al. (2001) (27), situado en la cubierta y que continúa por el perfil hueco (uno de los pilares) hasta el suelo y de allí, mediante conducción subterránea hasta los laboratorios de la Universidad de Almería donde los investigadores estudiarán la posibilidad de recircular o aprovechar dichas aguas, ricas en nutrientes, para otros cultivos existentes en el campus universitario o de influencia en la zona, como hortalizas invernadas. Estudios parecidos ya se están realizando por Syme et al. (2004) (43), Kim et al. (2005a) (23), Diet y Clausen (2006) (16) y Diet (2007) (15).

En ningún momento se filtrará al subsuelo y será reutilizada, evitándose los problemas mencionados por Steinberger (1998) (41), Kim et al. (2006) (22), Kim et al. (2005b) (24) y Berndtsson et al. (2006) (12). Además, será posible el estudio de especies autóctonas en altura y con diferentes sustratos, emulando, por así decirlo, similares trabajos de investigación llevados a cabo por Truex (1967) (45), Truex (1969) (46), Panayiotis et al. (2003) (35), Larre-Larrouy et al. (2003) (29), Monteruso et al. (2005) (31), Odeleye et al. (2007) (33) y Krajcovicova (2007).

Con la instalación de placas solares se podrá garantizar la iluminación de la pérgola de forma ecológica como ya intuían Ciamberlini et al. (2003) (27) además de repercutir en el ahorro energético, hecho que coincide con Wong et al. (2003) (47) y Neila et al. (2008) (48).

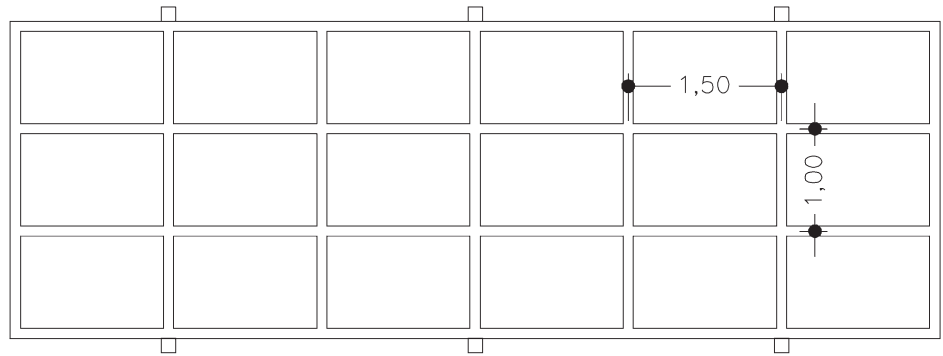
No hay que olvidar que la situación de la pérgola en el campus universitario podría influir en las comunicaciones, ya que a

1. Vista del conjunto de pérgolas.

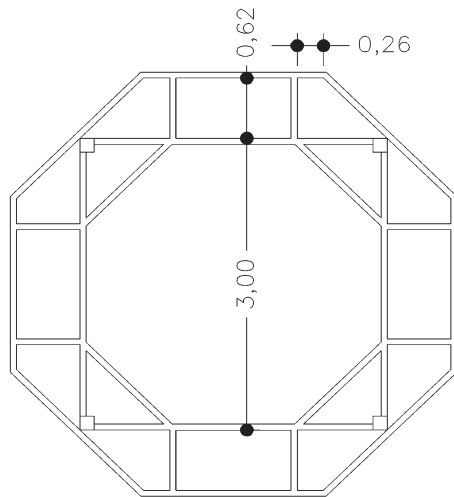
2. Entramado de la pérgola rectangular.

3. Plano inferior de la pérgola octogonal.

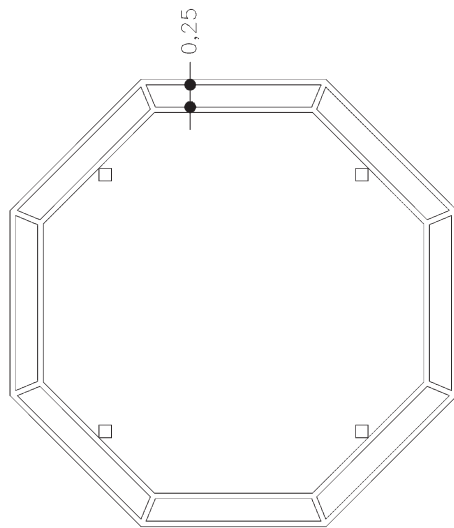
4. Plano superior de la pérgola octogonal.



2



3



4

Taga *et al.* (2001) (44) les ocurrió, aunque nuestra pérgola es más baja que los edificios colindantes y este hecho posiblemente no se producirá. Igualmente, será prácticamente imposible que se estanque el agua debido al sistema de drenaje, por lo que se evitarán los posibles problemas debidos a este hecho anteriormente estudiados por Heukelbach *et al.* (2001) (19) y Montgomery y Ritchie (2002) (32).

3.2. Descripción de la estructura

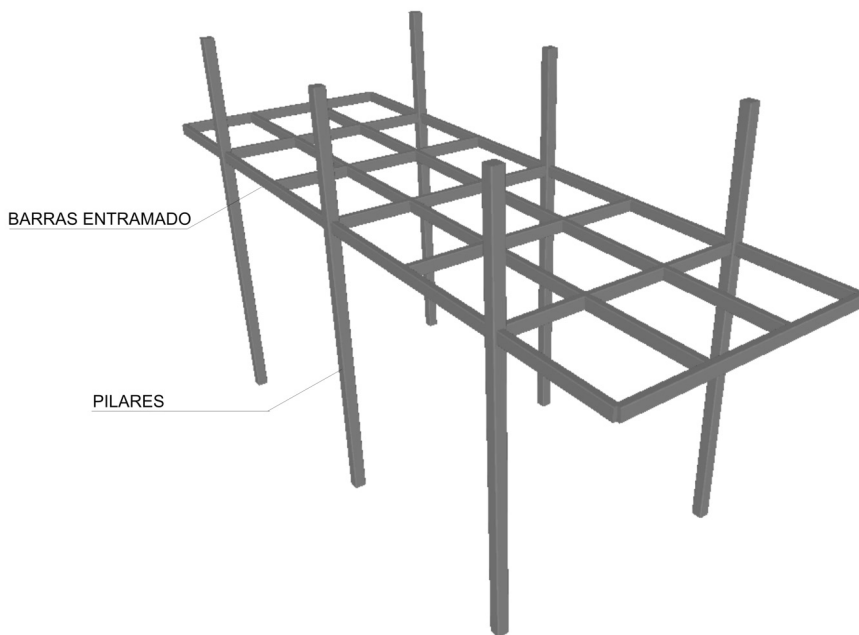
Una vez descritas las bondades del conjunto diseñado en el presente apartado se va a proceder a describir geoméricamente la estructura de forma minuciosa.

La pérgola rectangular (figura 2) responde a un diseño relativamente clásico en el que se configura un entramado, con unas dimensiones entre ejes de perfiles exteriores de 9,0 m de largo y 3,0 de ancho, de perfiles huecos rectangulares, soportados por seis pilares rectangulares, soportados por seis pilares huecos cuadrados. El entramado consiste en cuatro perfiles longitudinales colocados a 1 m de separación y siete transversales a 1,5 m, situándose el conjunto a 3,5 m de altura, mientras que los pilares superan esta altura en 2,5 m y hasta cuyo final llegan dos tirantes de cable de acero que parten de cada uno de los dos nudos contiguos no soportados por pilares de las dos barras longitudinales externas.

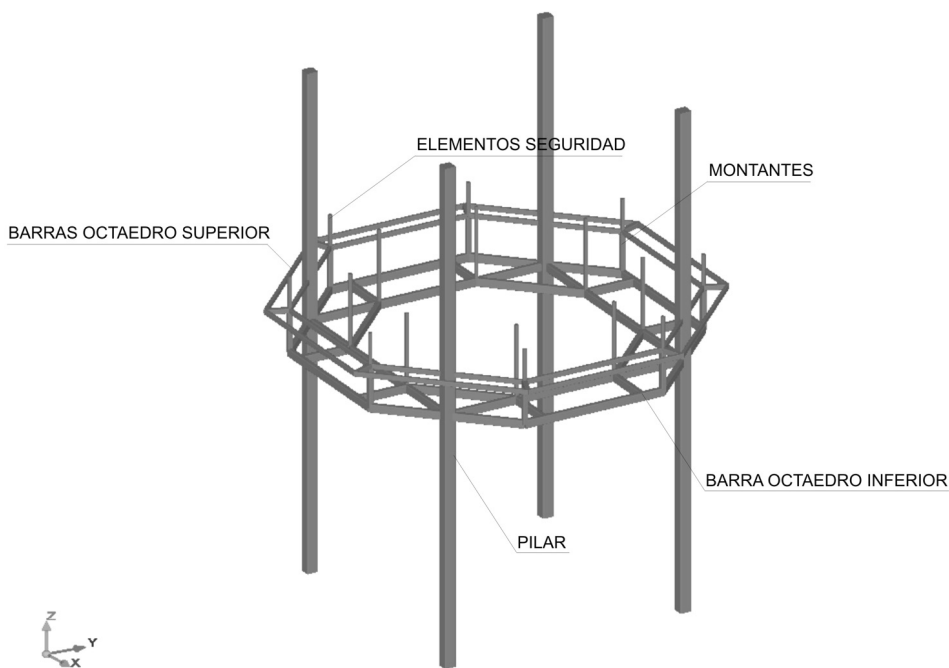
Por el contrario, la pérgola octogonal presenta un diseño más complejo, encontrándose los perfiles en dos planos horizontales paralelos, partiendo el inferior de un cuadrado de 3 m de lado sobre el que se circunscribe un octaedro (figura 3).

Posteriormente se colocan ocho barras perpendiculares al cuadrado originario, situadas a una distancia de 26 cm de la esquina interior del octaedro, para que, de este modo, las barras de refuerzo colocadas en las esquinas del cuadrado queden a una distancia del octaedro de 62 cm, configurando, a su vez, un nuevo octaedro interior. Los pilares se encuentran en las esquinas del cuadrado, presentando una altura hasta la base de estos octaedros de 3 m.

A una altura de 0,5 m por encima de este primer octaedro exterior, se sitúa uno exactamente igual soportado por ocho montantes anclados a los vértices coincidentes en proyección horizontal de ambos. Del mismo modo, este último octaedro se conecta con los pilares, los cuales presentan una altura total de 6,0 m.



5



6

Concéntricamente a este último octaedro superior se sitúa otro en el mismo plano horizontal separado hacia el exterior 25 cm y unido a través de perfiles colocados en los vértices (figura 4). Todo el acero empleado en el conjunto es S275 JR, aunque se han utilizado diferentes tipos de perfiles metálicos para los distintos elementos estructurales que configuran ambas tipologías, los cuales se describen a continuación:

I. Pérgola rectangular (figura 5)

– Pilares: 6 pilares exteriores de perfil hueco cuadrado #140.5 de 6,00 m.

- Barras longitudinales del entramado: 4 barras de perfil hueco rectangular #140.80.4 con una longitud de 9 m.
- Barras transversales del entramado: 7 barras de perfil hueco rectangular #140.80.4 con una longitud de 3 m.
- Tirantes: 12 tirantes de cable trenzado de acero Ø 10 (no representado en la figura 4 y sin función estructural).

II. Pérgola octogonal (figura 6)

– Pilares: 4 pilares exteriores de perfil hueco cuadrado #140.5 de 6,00 m.

5. Esquema general de la estructura de la pérgola rectangular.

6. Esquema general de la estructura de la pérgola octogonal.

- Barras de los octaedros del plano inferior: 8 barras de perfil hueco rectangular #100.60.4 con una longitud de 1,76 m y 8 barras de perfil hueco rectangular # 100.60.4 con una longitud de 1,23 m.
- Barras de refuerzo y unión de los octaedros del plano inferior: 8 barras de perfil hueco #100.60.4 con una longitud de 0,82 m y 8 barras de perfil hueco rectangular # 100.60.4 con una longitud de 0,62 m.
- Montantes: 8 barras de perfil hueco cuadrado #60.3 con una longitud de 0,50 m.
- Barras de los octaedros del plano superior: 8 barras de perfil hueco rectangular #60.40.3 con una longitud de 1,76 m y 8 barras de perfil hueco rectangular # 60.40.3 con una longitud de 1,95 m.
- Barras de unión de octaedros del plano superior: 8 barras de perfil hueco cuadrado #60.3 con una longitud de 0,25 m.
- Barras verticales de la barrera de protección: 8 barras de perfil hueco cuadrado #40.3 con una longitud de 1 m, 8 barras de perfil hueco cuadrado # 40.3 de una longitud de 0,44 m.
- Cables barrera protección: 14 cables trenzados de acero \varnothing 10 (no representados en la figura), dispuestos de modo que no tengan aberturas que puedan ser atravesadas por una esfera de 100 mm de diámetro.

3.3. Funcionamiento estructural

En el caso de la pérgola rectangular, las vigas que configuran el entramado superior son las encargadas de transmitir tanto el peso del relleno de sustrato realizado, como el de las acciones correspondientes: sobrecarga de uso, nieve, viento y acciones accidentales.

Dichas solicitaciones son redistribuidas por el resto del entramado al tratarse de nudos rígidos hasta llegar a las conexiones con los pilares, las cuales son prácticamente empotramientos perfectos. Mediante esta redistribución conseguimos rebajar la sección necesaria de los perfiles del entramado y de los pilares.

Si bien los tirantes descritos en epígrafes anteriores no intervienen en el cálculo, en situaciones de grandes solicitaciones pueden coaccionar el desplazamiento de la cabeza del pilar en el eje x (plano de los pilares), lo cual contribuiría eficazmente a atenuar flexiones en los nudos perimetrales no apoyados.

Las barras que configuran el entramado funcionan fundamentalmente a cortante (7,83 kN) y momento flector (4,95 kN·m), junto con momento torsor las de los voladizos (0,44 kN·m), siendo el esfuerzo axial despreciable (-0,97 kN). Los pilares funcionan por su parte a momento flector en los dos planos

(3,44 kN·m) y obviamente a esfuerzos axiales (-33,30 kN).

Con respecto a la pérgola octogonal, ésta presenta un funcionamiento más complejo. La carga más importante es la de uso en el caso de los octaedros inferiores y la de la sobrecarga del sustrato en los superiores. Por lo tanto, las barras que configuran los octaedros soportan esfuerzos axiales importantes, en especial las que los conectan con los pilares (2,04 kN) que, a su vez, presentan cortantes (2,38 kN) y momentos flectores (1,32 kN·m) destacables. Los pilares obviamente trabajan a esfuerzo axial principalmente (-10,38 kN·m), soportando momentos flectores contenidos (0,24 kN·m).

3.4. Ejecución y montaje

Tanto el entramado horizontal de la pérgola rectangular, como el conjunto de octaedros se han fabricado en una sola pieza con nudos rígidos, empotrándose en los pilares.

Durante el cálculo, se tuvo presente el facilitar y hacer totalmente seguro el montaje, de modo que como ya se ha expuesto anteriormente existen elementos que se han introducido en la ejecución pero no así en el cálculo, pues durante algunas fases de montaje no se encontrarían, pudiendo sobrevenir el colapso de la estructura, tal es el caso de los tirantes de la pérgola rectangular.

Del mismo modo se han proyectado diversos apoyos a base de perfil laminado L 60.6 que facilitarán el montaje de las distintas partes preejecutadas en taller, y su unión mediante tornillos a los pilares previamente anclados a la cimentación.

4. CONCLUSIONES

Mediante la utilización de perfiles huecos de acero conformados en frío se pueden obtener diseños agradables, novedosos, integrados y vanguardistas para las estructuras auxiliares utilizadas en la jardinería moderna. El resultado así obtenido conjuga armónicamente funcionalidad, estética y economía.

La utilización de sustratos no excesivamente pesados y previamente ensayados permite ubicar los contenedores en zonas elevadas de estas estructuras, frecuentemente sobre su techumbre, sin comprometer una ejecución económica y sencilla.

Es posible incorporar a estas estructuras tubulares instalaciones de aprovechamiento de ciertas energías renovables, como pueden ser placas solares fotovoltaicas, permitiendo estos

perfiles el ocultamiento total de los cableados y demás elementos de la instalación, de modo que no distorsionen el principal objetivo de las mismas, como es el conseguir una zona de mayor confort para el usuario. Se consigue así una compensación del gasto nocturno en caso de conexión a red, o bien una independencia energética mediante la utilización de una dotación de acumuladores.

Al ubicar los sustratos en altura, es posible impermeabilizar el contenedor o contenedores en donde se dispone el sustrato y crear un sistema de drenaje y conducción de lixiviados a través de una instalación de evacuación de aguas oculta en el interior de los perfiles, lo que evitaría el principal problema expuesto en ensayos anteriores de cultivos sobre estructuras o tejados, la contaminación por fertilizantes; evitando además la propagación de cualquier plaga.

Esta circunstancia es especialmente relevante en la tipología octogonal ensayada al situarse el contenedor sobre los dos octógonos superiores proyectados, dejando el espacio inferior disponible para el alojamiento de dicha instalación.

Esta ventaja de la tipología octogonal expuesta determina también la posibilidad de llevar a cabo ensayos agronómicos de distintas especies ornamentales, evaluando, por ejemplo, su adaptación a las condiciones semiáridas.

Por último, y mediante la implementación de una escalera a la estructura octogonal diseñada se consigue, gracias a la distribución de octaedros estructurales inferiores, un uso adicional de estas estructuras apergoladas, que redundan a su vez en un factor adicional más para la realización de ensayos.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Ministerio de Fomento. Norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación (NCSE-2002). (Real Decreto 997/2002 de 27 de septiembre, BOE de 11 de octubre de 2002). Madrid, 2002.
- (2) Ministerio de Vivienda. Documento Básico SE-A. Seguridad Estructural. Estructuras de acero. Código Técnico de la Edificación. (Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, BOE nº 74 de 28 de marzo de 2006). Madrid, 2006.
- (3) Ministerio de Vivienda. Documento Básico SE-AE. Seguridad Estructural. Acciones en la edificación. Código Técnico de la Edificación. (Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, BOE nº 74 de 28 de marzo de 2006). Madrid, 2006.
- (4) Ministerio de Vivienda. Documento Básico SI. Seguridad en caso de Incendio. Código Técnico de la Edificación. (Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, BOE nº 74 de 28 de marzo de 2006). Madrid, 2006.
- (5) Ministerio de Vivienda. Documento Básico SE. Seguridad Estructural. Código Técnico de la Edificación. (Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, BOE nº 74 de 28 de marzo de 2006). Madrid, 2006.
- (6) Garrido Lagunilla, P.M. "Pensando en Jardines". Ediciones de Horticultura S.L. Reus, 1997.
- (7) Paez de la Cadena, F. "Historia de los estilos de la jardinería". Ed. Istmo. Madrid, 1997.
- (8) Porta, J.; López-Acevedo, M. y Roquero, C. "Edafología para la agricultura y el medio ambiente". Ed. Mundi-Prensa. Madrid, 1993.
- (9) Zapata, A.J. "Hidrología. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Almería". Almería, 2001.
- (10) Anon. 1974. "All on office roof - roof garden, rue-Saint-Martin, Lausanne". *Concrete Quarterly* 102: 6-9.
- (11) Anon. 1996. "Metropolitan Museum of Art roof garden". *Sculpture Review* 45 (2): 33-33.
- (12) Berndtsson, J. C., Emilsson, T. and Bengtsson, L. 2006. "The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality". *Science of the Total Environment* 355 (1-3): 48-63.
- (13) Caley, M. 2003. "Low Maintenance Roof Garden". *Poetry review* 93 (1): 111-111.
- (14) Ciamberlini, C., Francini, F., Longobardi, G., Piattelli, M. and Sansoni, P. 2003. "Solar system for exploitation of the whole collected energy". *Optics and Lasers in Engineering* 39 (2): 233-246.
- (15) Dietz M. E. 2007. "Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions". *Water Air and Soil Pollution* 186 (1-4): 351-363.
- (16) Dietz, M. E. and Clausen, J. C. 2006. "Saturation to improve pollutant retention in a rain garden". *Environmental Science & Technology* 40 (4): 1335-1340.
- (17) Elon, F. 1999. "Roof Garden". *Stand Magazine* 40 (2): 7-8.
- (18) Hammatt, H. 2002. "A world outside - Landscape architects design a detailed roof garden, providing a natural escape for patients and families at the St.-Louis Children's Hospital". *Landscape Architecture* 92 (5): 74-81.
- (19) Heukelbach, J., de Oliveira, F. A. S., Kerr-Pontes, L. R. S. and Feldmeier, H. 2001. "Risk factors associated with an outbreak of dengue fever in a favela in Fortaleza, north-east Brazil". *Tropical Medicine & International Health* 6 (8): 635-642.
- (20) Hien, W. N., Yok, T. P. And Yu, C. 2007. "Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate". *Building and Environment* 42 (1): 25-54.
- (21) Kahn, E. 1992. "A vase of country flowers + schnadelbach, terry roof-garden for a gourmet restaurant in Lyons, France". *Landscape Architecture* 82 (9): 64-65.

- (22) Kim, R. H., Jeong, J. W., Lee, S. H. and Gee, C. S. 2006. "Use of bauxite minerals to control pollutant outflow in urban areas". *Eco-Materials Processing & Design VII: Materials Science Forum* 510-511: 922-925.
- (23) Kim, R. H., Lee, S. and Kim, J. O. 2005a. "Application of a metal membrane for rainwater utilization: filtration characteristics and membrane fouling". *Desalination* 177 (1-3): 121-132.
- (24) Kim, R. H., Lee, S. Lee, J. H., Kim, Y. M. And Suh, J. Y. 2005b. "Developing technologies for rainwater utilization in urbanized area". *Environmental Technology* 26 (4): 401-410.
- (25) Kovac, C. 2000. "Roof garden acts as natural air conditioner (Sections of three top levels of the WestEnd-City-Center in Budapest are covered by soil nurturing countless trees, shrubs and flowers)". *Architectural Record* (8): 36-36.
- (26) Krajcovicova, D. 2007. "Testing the divergence of selected taxa of genus *Cotoneaster*, *Juniperus*, *Picea* and *Viburnum* - the influence of climate changes on intensive roof gardens". *Horticultural Science* 34 (2): 72-76.
- (27) Kronaveter, L., Shamir, U. and Kessler, A. "2001. Water-sensitive urban planning: Modeling on-site infiltration". *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce* 127 (2): 78-88.
- (28) Kumar, R. and Kaushik, S. C. 2005. "Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings". *Building and Environment* 40 (11): 1505-1511.
- (29) Larre-Larrouy M. C., Albrecht A., Blanchart, E., Chevallier, T. and Feller C. 2003. "Carbon and monosaccharides of a tropical Vertisol under pasture and market-gardening: distribution in primary organomineral separates". *Geoderma* 117 (1-2): 63-79.
- (30) Levinson, N. 1992. "Instant gratification extended + fager, robert project for the roof-garden of the boston federal-reserve-bank". *Landscape Architecture* 82 (9): 60-61.
- (31) Monterusso, M. A., Rowe, D. B. and Rugh, C. L. 2005. "Establishment and persistence of *Sedum* spp. and native taxa for green roof applications". *Hortscience* 40 (2): 391-396.
- (32) Montgomery, B. L. and Ritchie, S. A. 2002. "Roof gutters: A key container for *Aedes aegypti* and *Ochlerotatus notoscriptus* (Diptera : Culicidae) in Australia". *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 67 (3): 244-246.
- (33) Odeleye, F. O., Odeleye, O. M. O., Olaleye, A. O. and Yakubu, F. B. 2007. "Effect of sowing depth on emergence, growth and yield of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench)". *Journal of Food Agriculture & Environment* 5 (1): 205-209.
- (34) Onmura, S., Matsumoto, M. and Hokoi, S. 2001. "Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens". *Energy and Buildings* 33 (7): 653-666.
- (35) Panayiotis, N., Panayiota, T. and Ioannis, C. 2003. "Soil amendments reduce roof garden weight and influence the growth rate of *Lantana*". *Hortscience* 38 (4): 618-622.
- (36) Pfeffer, J., Deyton, D. and Stewart, C. 2007. "Designing a roof top horticultural therapy garden for a geriatric behavior center". *Hortscience* 42 (4): 946-946.
- (37) Power E. R. 2005. "Human-nature relations in suburban gardens". *Australian Geographer* 36 (1): 39-53.
- (38) Rahim, N. H. A. 2001. "Utilisation of new technique to improve the efficiency of horizontal solar desalination still". *Desalination* 138 (1-3) Sp. Iss. Sl: 121-128.
- (39) Rinkevich, B. 2005. "Conservation of coral reefs through active restoration measures: Recent approaches and last decade progress". *Environmental Science & Technology* 39 (12): 4.333-4.342.
- (40) Steadman, T. A. 2000. "Up on the roof - The greening of the Pentagon (Rooftop garden project planned for the north face of the building", *Landscape Architecture by Lee-&Liu*). *Landscape Architecture* 90 (4): 22-22.
- (41) Steinberger, H. 1998. "Health, safety and environmental risks from the operation of CdTe and CIS thin-film modules". *Progress in Photovoltaics* 6 (2): 99-103.
- (42) Stevens, M. 1995. "The promotion of wellness + versen, michael roof garden at the Patricia-Neal-Rehabilitation-Center in Knoxville, Tennessee". *Landscape Architecture* 8 (1): 64-67.
- (43) Syme, G. J., Shao, Q. X., Po M. and Campbell E. 2004. "Predicting and understanding home garden water use". *Landscape and Urban Planning* 68 (1): 121-128.
- (44) Taga, T., Ichitsubo, S., Ogawa, Y. and Itoh, K. 2001. "1.9-GHz-band radio propagation characteristics in an open urban environment and tree loss prediction using a loss layer model. Electronics and Communications in Japan Part I"-*Communications* 84 (8): 49-61.
- (45) Truex, P. 1967. "Garden on your roof". *Horticulture* 45 (4): 30-&.
- (46) Truex, P. 1969. "Conifers in winter roof garden". *Horticulture* 47 (1): 44-&.
- (47) Wong N. H., Cheong, D. K. W., Yan, H., Soh, J., Ong, C. L. and Sia, A. "2003. The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore". *Energy and Buildings* 35 (4): 353-364.
- (48) Neila, F. J., Bedoya, C., Acha, C., Olivieri, F., Barbero, M. 2008. "The ecological rooftops of third generation: an new constructive materials". *Informes de la Construcción* 60 (511): 15-24.

* * *