

Aislamiento acústico de prototipos de techos ecológicos multicapas. Hacia una arquitectura verde con calidad acústica

*Ede Coromoto Martínez**

*Lesvia Pérez Laurens**

*Celso E. Limpe***

*Magalis Gallardo**

Resumen

Este trabajo se inscribe en el debate contemporáneo de la sostenibilidad y el confort ambiental, hacia la búsqueda de una arquitectura verde y ciudades sostenibles. El mismo tuvo como objetivo determinar el aislamiento acústico de prototipos de techos multicapas con materiales ecológicos. La investigación se desarrolló desde una perspectiva hermenéutica, heurística y experimental proponiéndose techos ecológicos con distintos materiales naturales como especies vegetales (Laurel y Sábila) y sustratos de fibra de coco superpuestos sobre un techo base liviano, de bajo costo, impermeabilizado y con materiales antiraíces. Al sustrato se le varió su espesor de 10 a 20 cm, sus condiciones seca o húmeda y su densidad: 100% fibra de coco, 66% fibra de coco (con mezcla de 17% de capa vegetal y 17% de abono) y 33% fibra de coco (con mezcla de 33% de capa vegetal y 33% de abono). En los resul-

* Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.
perezLaurens@gmail.com

** Laboratorio de Acústica, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.

tados de los experimentos se detectó que las especies vegetales no aportaron aislamiento, a mayor espesor y densidad del sustrato se incrementó la reducción sonora, el aislamiento acústico del techo en condición seca fue mayor que en condición húmeda. La presente investigación proporciona aportes a la medición del aislamiento acústico a ruido aéreo para techos verdes multicapas bajo ensayos in situ, el empleo de los materiales de procedencia local como los utilizados en esta investigación fomenta el respeto por la naturaleza y producen un menor impacto ambiental.

Palabras clave: Aislamiento acústico, ensayo in situ, techos ecológicos multicapas, arquitectura verde.

Soundproofing Multilayer Green Roof Prototypes. Toward a Green Architecture with Sound Quality

Abstract

This work is part of the contemporary debate about sustainability and environmental comfort in the search for green architecture and sustainable cities. Its main purpose was to determine soundproofing for multilayer green roof prototypes built with ecological materials. The research was developed according to an experimental, hermeneutic and heuristic perspective. Green roofs were proposed made of different natural materials, such as aloe vera and laurel, and coconut fiber substrata overlapped on a waterproofed, low-cost, lightweight roof made of root-proof materials. Substratum thickness varied from 10 to 20 cm; its conditions were dry or humid. Densities studied were: 100% coconut fiber, 66% coconut fiber (mixed with 17% topsoil and 17% compost) and 33% coconut fiber (mixed with 33% topsoil and 33% compost). Among the results of the experiments, it was detected that plants do not contribute to soundproofing; the greater the thickness and density of the substratum, the more the noise was reduced. A roof's soundproofing was greater in dry than in humid conditions. This research provides contributions to air-borne soundproofing measurement for on-site multilayer

green roofs. Utilization of local materials like those used in this study promotes respect for nature and produces a lower environmental impact.

Keywords: Soundproofing, on-site testing, multilayer ecological roofs, green architecture.

Introducción

La preocupación por el medioambiente ha acentuado las estrategias enfocadas a la creación de edificios verdes o sostenibles de manera que se establezca una relación más estrecha y respetuosa entre el hombre y la naturaleza, buscando el aprovechamiento intensivo de los recursos naturales, un alto nivel de confort y calidad de vida (Alfaro, 2015). Por otro lado, el rápido crecimiento urbano y el incremento de los niveles de ruidos en las ciudades, dado el elevado aumento de la población, exige mayores requerimientos de confort acústico para el mejoramiento de la calidad de vida en zonas urbanas, obligando a considerar en el diseño de edificios el uso de materiales acústicos para la protección sonora (Recuero 1999; Arau 1999; Van Renterghem y Botteldooren 2009, Edwards 2009). Es importante destacar que el estudio del aislamiento acústico de los materiales puede ser en laboratorio o bajo ensayo in situ; no existe una norma para determinar el aislamiento acústico de los materiales en techos bajo ensayo in situ, pero si existen para las fachadas.

Desde ámbito descrito, en estas últimas décadas la investigación acústica comienza a centrar su atención en los techos ecológicos por ser una opción natural utilizada en ambientes externos que proporciona un aislamiento acústico en áreas urbanas expuestas a altos niveles de ruido de tráfico vehicular y de ruido de baja frecuencia de los aviones (Van Renterghem y Botteldooren, 2009; Wong *et al.* 2010). En este artículo se abordó el estudio de los techos ecológicos o verdes dado los beneficios ambientales que proporcionan en el aislamiento térmico y acústico, el manejo de la escorrentía de agua de lluvia, la reducción del efecto de la isla de calor urbano y la protección de la membrana impermeable del techo que reduce el costo de mantenimiento y extienden su vida útil (Dinsdale *et al.* 2006; Environmental Affairs Department, 2007; Getter *et al.* 2007; Glass, 2007; Connelly y Hodgson, 2008; Nicholas *et al.* 2010; Lin y Lin, 2011), Figura 1.



FIGURA 1. Arquitectura verde

Fuente: <http://www.iconosdevenezuela.com/?p=19481>.

En la búsqueda de la calidad acústica y de nuevas soluciones constructivas, en este trabajo se propusieron techos multicapas con materiales ecológicos de una localidad tropical, con el objetivo de determinar su aislamiento acústico a través de ensayos in situ, buscando el mejor desempeño de aislamiento acústico a ruido aéreo.

La investigación se estructuró en tres fases: hermenéutica, heurística y experimental. En la fase hermenéutica se interpretaron experiencias experimentales previas, entrevistas a expertos, normas internacionales y teorías de referencia sobre la arquitectura verde, los techos verdes multicapas y las metodologías para determinar el aislamiento acústico de los materiales. De la comprensión del significado de estos aspectos, se inició una fase heurística o fase proyectiva, de invención o de las propuestas planteándose una metodología para determinar el aislamiento acústico de techos ecológicos multicapas bajo ensayo in situ y el diseño de prototipos de techos multicapas con materiales ecológicos. La fase experimental se abordó desde una perspectiva cuantitativa-positivista y una visión sistémica, interdisciplinaria y compleja porque se vincularon conocimientos de la arquitectura, agronomía, física y las tecnologías de información y comunicación. La metodología propuesta se aplicó a tres casos de estudio, obteniéndose la retroalimentación y validación de la misma.

1. Techos verdes multicapas con materiales ecológicos






Los techos verdes son aquellos que están constituidos por vegetación en su parte superior, son una opción natural utilizada en ambientes externos que pueden mitigar los niveles de ruido inaceptables que afectan la salud, la seguridad y el bienestar de la población, proporcionan grandes ventajas medioambientales y un beneficio a la comunidad (Ecoticias, 2013). Existen dos tipos principales de techos verdes o ecológicos: intensivo y extensivo. Los intensivos incluyen vegetación con árboles pequeños y arbustos, están diseñados para ser accesibles y pueden cubrir sólo una pequeña fracción de la superficie del techo, requieren un sustrato con una profundidad mayor de 20 cm, de una irrigación, mantenimiento y refuerzo estructural adicional. Las cubiertas extensivas incluyen especies herbáceas tolerantes al clima, pueden cubrir superficies extensas del techo, requieren mínima irrigación y un sustrato con profundidades menor de 20 cm. (Briz, 2004; Environmental Affairs Department, 2007; Nicholas *et al.* 2010).

Por lo general, las cubiertas ecológicas extensivas están sobre un techo plano que es el soporte estructural, principalmente están compuestas de varias capas, cada una tiene su función específica: una capa de vegetación con especies autóctonas, un sustrato orgánico o inorgánico de poco espesor, bajo peso y con nutrientes suficientes para el desarrollo vegetativo de las especies, capa anti-raíces, capa aislante opcional, capa filtrante para la retención de las partículas finas, capa drenaje y capa de impermeabilización para proteger el edificio. En este trabajo se realizaron experimentos utilizando como capa vegetal dos especies autóctonas: *Aloe barbadensis* (Sábila) y *Widelia Trilobata* (Laurel); asimismo se utilizó como sustrato la fibra de coco por ser una alternativa local de material ecológico de menor costo (Lin y Lin, 2011), la arcilla expandida se utilizó como capa drenaje y retención de la humedad. La pelusa de coco fue usada como parte de la capa aislante (tabla 1).

1.1. Sustrato de fibra de coco

Los sustratos de cultivo son medios en los cuales se desarrollan las plantas sustituyendo las funciones del suelo natural; cultivar en estos sustratos implica que las plantas van a desarrollar sus raíces en un volumen restringido, por lo que se requiere evaluar la calidad del material en los as-

TABLA 1. Materiales ecológicos

		
Aloe barbadensis	Widelia trilobata	Fibra de coco 100%
		
Mezcla con Fibra de coco	Arcilla expandida	Pelusa de coco

Fuente: Elaboración propia (2015).

pectos de la capacidad de retención y distribución de agua y aire en espacio poroso, grado de evolución de la materia orgánica, además de tener en cuenta aspectos de tipo químico como: la salinidad, la acidez, el contenido en carbonatos y en nutrientes (Briz, 2004). Los componentes de los sustratos pueden ser orgánicos o inorgánicos. Entre los materiales orgánicos que se utilizan están la turba, residuos forestales y agrícolas como corteza de pino, fibra de coco, cáscara de arroz, entre otros; por otra parte, entre los materiales de origen mineral están las gravas, arenas, tierra volcánica y los procesados, lana de roca, arcilla expandida, entre otros (Briz, 2004).

La fibra de coco es una fibra multicelular que tiene como principales componentes la celulosa y el leño, lo que confiere elevados índices de rigidez, dureza y durabilidad. Es un producto natural y versátil indicado para aislamiento térmico y acústico (Colegio oficial de Aparejadores y Arquitectos, 2008). Además, es un sustrato orgánico utilizado en el sector hortícola posee propiedades físicas y químicas que mejoran el nivel nutricional de las plantas siendo un medio de crecimiento adecuado para muchos cultivos, se utiliza sola o en combinación con otros materiales.

Las buenas propiedades físicas de la fibra de coco tales como la porosidad, capacidad de retención de agua, capacidad de drenaje, buena aireación y sus propiedades químicas como pH adecuado, conductividad eléctrica óptima, baja conductividad al calor, su naturaleza orgánica y buena degradación no conlleva a contaminación, mejora las propiedades químicas de los sustratos y hace a los cultivos tolerantes a la sequía (Wira et

al. 2011). Para usos comerciales en las paredes, la fibra de coco debe ser mezclada con aditivos para mejorar sus características como su rigidez, resistencia a los hongos y propiedades inflamables (Glé *et al.* 2011; Hosseini *et al.* 2011).

2. Prototipos de techos verdes multicapas con materiales ecológicos

La escasa literatura en materia de aislamiento acústico en techos, sugiere el uso de la tecnología de techos verdes para incrementar la masa y la pérdida de transmisión sonora en todas las frecuencias (Connelly y Hodgson, 2008). En este sentido, para incrementar el aislamiento acústico sin tener que aumentar la masa considerablemente, se utiliza un número de capas más delgadas de materiales distintos de tal manera que el sonido se reduzca por etapas. Este método también se usa para reducir costos, peso y restricciones de espacios (Rossing 2007). Desde esta perspectiva, se diseñaron y construyeron tres prototipos de techos con materiales ecológicos propios de la región, compuesto por multicapas con diferentes configuraciones y sobre ellas vegetación del trópico húmedo. Por cada superposición de estas multicapas se realizaron ensayos *in situ*, determinándose los parámetros de aislamiento acústico. Los ensayos se desarrollaron adaptando la metodología de medición recomendada para fachadas por la normativa internacional ISO 140-5.

En el Prototipo de Techo Ecológico 1 se realizaron cinco ensayos considerando las distintas multicapas, variando el espesor y las condiciones seca y húmeda del sustrato de fibra de coco, para determinar cómo varía el aislamiento acústico de acuerdo a su espesor y condición. Así mismo, se determinó el aislamiento acústico de la especie vegetal *Aloe barbadensis* (figura 2). En el Prototipo de Techo Ecológico 2 se realizaron cuatro ensayos considerando las distintas multicapas y variando la densidad del sustrato de fibra de coco (figura 3). En el Prototipo de Techo Ecológico 3 se realizaron cuatro ensayos de aislamiento acústico de las distintas multicapas, el efecto de una cámara de aire, de la densidad del sustrato y el comportamiento acústico de una especie vegetal *Widelia Trilobata* (Laurel), figura 4.

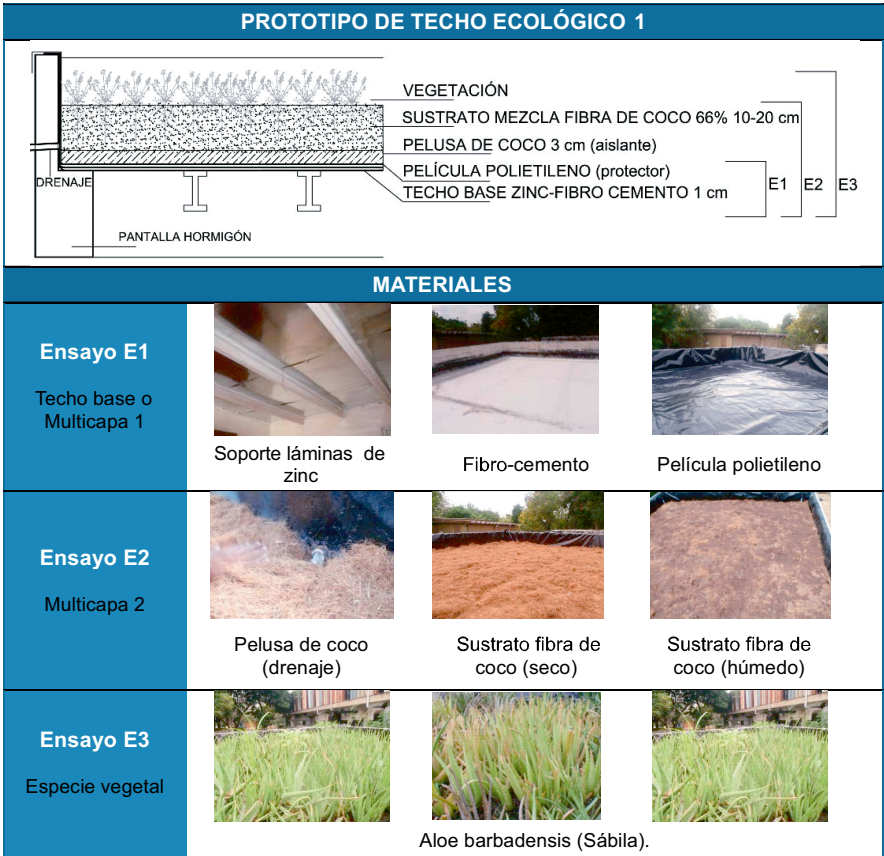


FIGURA 2. Configuración de prototipo de techo ecológico 1
 Fuente: Elaboración propia (2015)

El sistema de aislamiento del Prototipo de Techo Ecológico 1 estuvo conformado por tres multicapas: la primera (techo base) que cumple la función de soporte y protección de la humedad; la segunda compuesta por materiales ecológicos que tienen la función de aislante, drenaje y sustento de la especie vegetal; y la última constituida por una vegetación autóctona de la región tropical.

La primera multicapa o techo base se apoyó sobre vigas metálicas y está conformado por materiales locales livianos de fácil remoción y de bajo costo tales como: lámina metálica de zinc lisa galvanizada de espesor 0.20 mm/Calibre 35, lámina de fibrocemento de 1 cm de espesor con un



FIGURA 3. Configuración de prototipo de techo ecológico 2
 Fuente: Elaboración propia (2015).

acabado final de pintura impermeabilizante y una película de polietileno de baja densidad y espesor de 200 micras, que cumple una función protectora de la humedad del sustrato, antiraíces y tiene un drenaje para la salida del agua. En la Figura 2 se detallan los materiales de las distintas multicapas.

El sistema de aislamiento del Prototipo de Techo 2 estuvo conformado por tres multicapas: la primera o techo base; la segunda conformada por el material aislante, de protección de la humedad y drenaje; la tercera constituida por un sustrato de fibra de coco de diferentes densidades. Para cada una de ellas se realizaron ensayos de aislamiento acústico in situ.

El sistema de aislamiento acústico del Prototipo de Techo Ecológico 3, estuvo compuesto por tres multicapas: la primera conformada por el te-

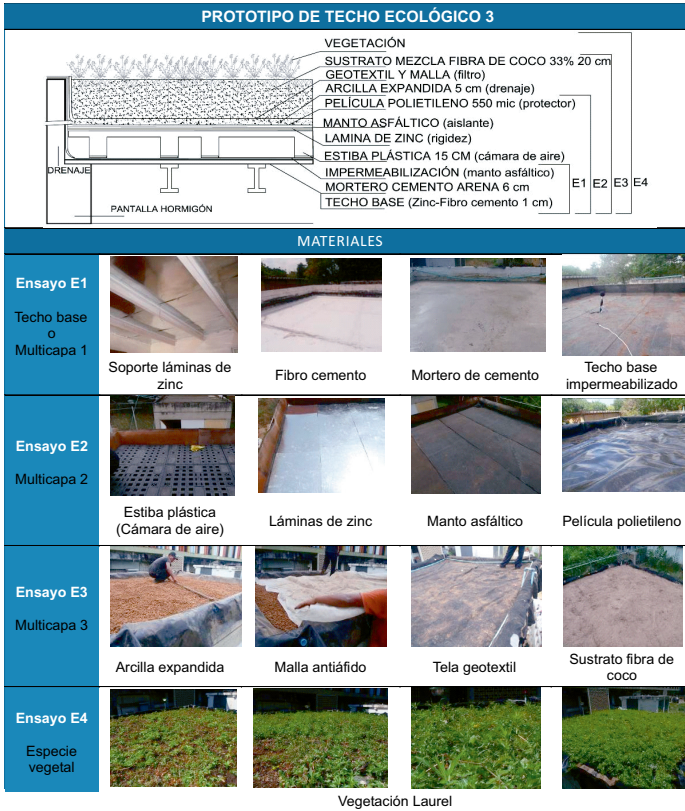


FIGURA 4. Configuración de prototipo de techo ecológico 3
Fuente: Elaboración propia (2015).

cho base; la segunda compuesta por materiales reciclados y aislantes; la tercera formada por materiales ecológicos que tienen la función de aislante, drenaje y sustento de la vegetación; y la última constituida por una especie vegetal autóctona de la región tropical.

En los Prototipos de Techos Ecológicos 2 y 3, la primera multicapa o techo base estuvo compuesto de materiales locales livianos y de bajo costo como: lámina metálica de zinc lisa galvanizada calibre 20 de espesor 95 mm y lámina de fibrocemento de 1 cm de espesor, con un acabado final de mortero de cemento (arena y cemento) de 5 cm con una pendiente del 1%. El techo incluye drenajes para la salida del agua y está circunscrito por una pantalla de hormigón de 40 cm de altura, ambos se impermeabilizaron con un manto asfáltico de 3,2 mm de espesor y cemento plástico para la protección de la humedad.

3. Metodología de mediciones in situ para el aislamiento acústico de techos multicapas

Los ensayos in situ para determinar el aislamiento acústico de los materiales de los prototipos de techos multicapas se realizaron en un módulo experimental ubicado en el Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad del Zulia, en Maracaibo-Venezuela, el cual se acondicionó acústicamente para controlar la transmisión de ruido exterior (figura 5). El módulo tiene un área de 2,77 m x 2,76 m y una altura de 2,45 m. El área de techo en ensayo es de 10,5 m².

Los ensayos acústicos se realizaron empleando el método global con altavoz el cual requieren una plataforma tecnológica que funcione de manera integrada, constituida por equipos acústicos de emisión y recepción sonora, los equipos de computación y los software utilizados para la ecualización y el monitoreo de la señal acústica (figura 6).

Los equipos de emisión sonora utilizados fueron: un sistema de altavoces compuesto por un subwoofer de 15" para la emisión de ondas sonoras de baja frecuencia; un sistema de altavoces compuesto por un subwoofer de 12" para la emisión de ondas de media frecuencia y un driver de radiación directa para la emisión de ondas de alta frecuencia; y un amplificador de banda ancha de operación disponible entre 20 Hz y 20 kHz, con sistema integrado de generador de ruido rosado y ecualizador paramétrico. El ruido rosado fue generado de forma digital por un software especializado, transmitido al amplificador y de él al sistema de altavoces.



FIGURA 5. Módulo experimental.
Fuente: Elaboración propia (2014).

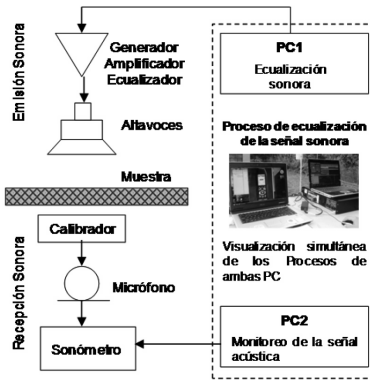


FIGURA 6. Plataforma tecnológica
Fuente: Elaboración propia (2014).

Es importante destacar que el ruido rosado fue ecualizado a través de un ordenador utilizando un Software especializado, lo cual permitió aumentar o disminuir el nivel de presión sonora en cada frecuencia, con el objeto de generar un espectro continuo. Para la transmisión de esta señal ecualizada se utilizaron los dos sistemas de altavoces para cubrir un ancho de banda desde 20 Hz a 20 kHz.

Asimismo, como instrumentación de recepción sonora se utilizaron: un calibrador de campo de nivel sonoro Clase 1; un micrófono de patrón de captación omnidireccional de respuesta plana en el dominio de la frecuencia entre 20 Hz a 20 kHz y un sonómetro analizador Clase 1 en tiempo real (RTA), todos cumplen con los estándares de la IEC 61672. La señal que sale del amplificador y del sistema de altavoces es registrada y guardada por el sonómetro analizador para su posterior análisis. El sonómetro se conectó a un ordenador para facilitar el monitoreo de las mediciones.

3.1. Mediciones en el exterior del módulo experimental

En el aislamiento acústico a ruido aéreo utilizando el método global con altavoz, la norma ISO 140-5 establece las posiciones de los altavoces y del sonómetro para medir los niveles de ruido de fondo exterior y de presión sonora exterior, de modo que minimice las variaciones del nivel de presión sonora sobre la muestra. En los ensayos in situ el sonómetro se ubicó en el centro del techo a una altura de 2 m (en los Prototipos de Techos 1 y 2) y 1,50 m (en el Prototipo de Techo 3). Las posiciones de los altavoces se muestran en la figura 7.

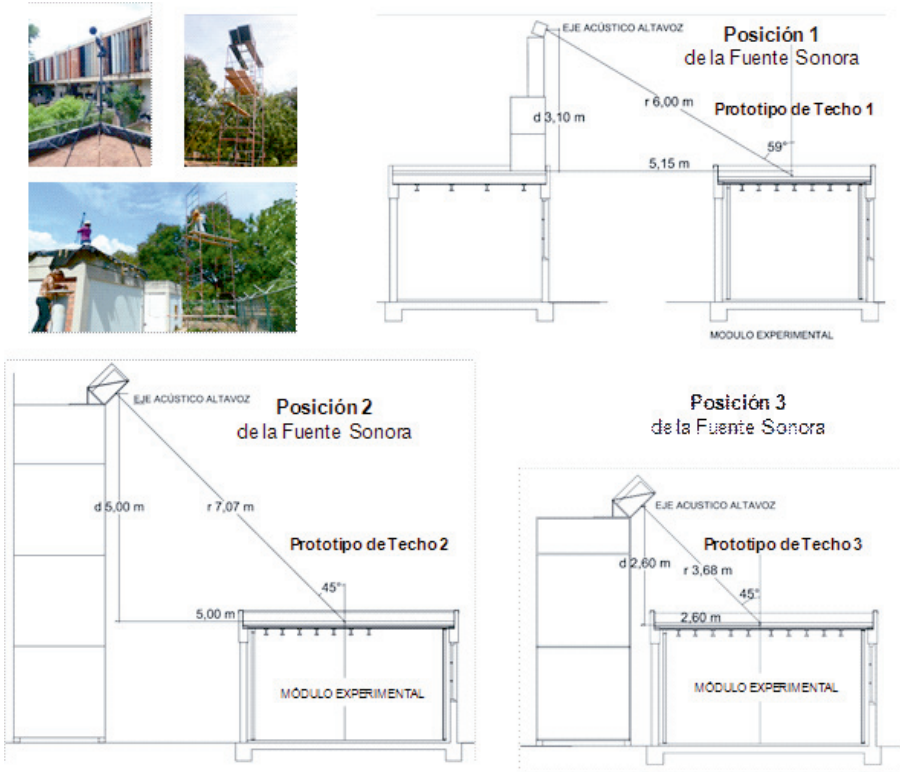


FIGURA 7. Las posiciones de los altavoces
Fuente: Elaboración propia (2015).

Antes de cada ensayo el sonómetro se calibró y luego se realizaron las campañas de medidas. Para obtener el nivel de ruido de fondo exterior medio (L_b) se tomaron seis medidas: tres al inicio del ensayo y tres al final, con una duración de 3 minutos cada una. Sobre este nivel de ruido de fondo se emitió con los altavoces una señal sonora de ruido rosado mayor a 10 dB; esta señal se ecualizó y se realizaron 18 repeticiones de medidas del nivel de presión sonora exterior con una duración de 10 a 30 segundos, para obtener el nivel de presión sonora exterior medio (L_1), en bandas de frecuencia central de 1/3 de octavas.

3.2. Mediciones en el interior del módulo experimental

En el interior del módulo experimental se realizaron las campañas de medidas de los niveles de presión sonora interior (L_2) (combinación del ruido de fondo más el generado por una fuente sonora artificial ubicada en el exterior del módulo), el tiempo de reverberación (T_r) y los niveles del ruido de fondo interior (L_b). Es importante destacar que el campo sonoro en el interior de un recinto varía entre un punto y otro debido a su forma geométrica, a la reflexión y absorción que se produce en las paredes, techo y elementos que se encuentran en el interior del local. Debido a esto, es necesario realizar un muestreo del nivel sonoro en el espacio mediante diferentes posiciones de micrófono (Meza, 2007). Las distancias mínimas que deben mantener los micrófonos son: entre posiciones del micrófono 0,7 m, entre cualquier posición de micrófono y las superficies límites del módulo 0,5 m (ISO 140-5,1998).

Con la emisión sonora del altavoz, se midieron los niveles de presión sonora en el interior del módulo en 18 posiciones (en los Prototipos de Techo 1 y 3). La distribución espacial de las posiciones del micrófono fueron: 9 a una altura de 1,50 m respecto del piso y las otras 9 a una altura de 2 m. Las posiciones se distribuyeron uniformemente dentro del módulo con una separación del micrófono a la pared de 0,50 m y de 0,80 m entre posiciones de micrófonos de acuerdo a la norma ISO 140-5. En el Prototipo de Techo 2 se tomaron 10 medidas: 5 a una altura de 1,50 m respecto del piso y las otras 5 a una altura de 2 m, la duración de cada medida fue de 10 segundos o hasta que se estabilizara la señal sonora (Figura 8).

Los niveles de ruido de fondo en el interior del módulo se midieron tomando 3 medidas en diferentes posiciones (P3, P6, P9) a una altura de 1,50 m con una duración de 3 minutos cada una. El tiempo de reverberación se obtuvo por el método de fuente impulsiva generado por la explosión de globos, se tomaron 6 medidas dentro del módulo experimental en 3 posiciones (P5, P7, P9) con 2 lecturas cada una. Luego de las repeticiones de medida, se promediaron energéticamente los niveles de ruido de fondo (L_b), de presión sonora exterior (L_1) y de presión interior (L_2). El tiempo de reverberación promedio (T_r) se calculó de acuerdo a la ecuación (1), donde T_{ri} (dB) son los tiempos de reverberación medidos desde T_{r1} hasta T_m y el tiempo de reverberación de referencia es $T_0 = 0,5$ s. Cuando se usa una fuente sonora artificial la diferencia de niveles estanda-

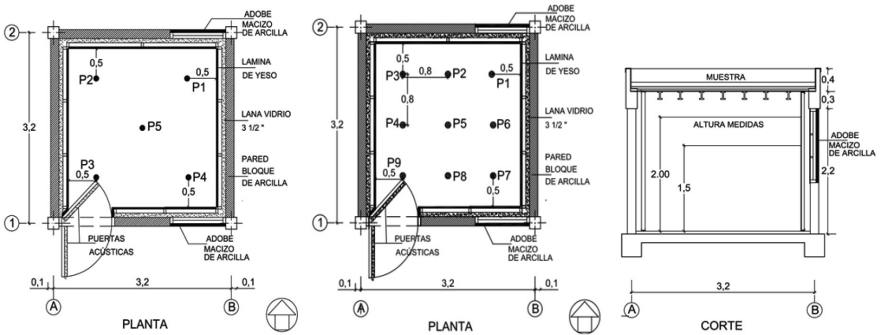


FIGURA 8. Posiciones micrófono para L_2 , L_b y T_r .
 Fuente: Elaboración propia (2015).

rizada (D_{nT}) y el índice de reducción sonora aparente (R_i) por bandas de frecuencia de un 1/3 de octava, se calculan según las ecuaciones (2) y (3).

$$T_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{ri} \quad (1)$$

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 101 \log \left(\frac{T_r}{T_0} \right) \quad (2)$$

$$R_i = L_i - L_2 + 101 \log \left(\frac{S}{A} \right) - 1,5 \quad (3)$$

Donde S es el área del techo bajo ensayo y A es el área de absorción sonora equivalente del local de recepción. El índice de reducción sonora aparente (R_i) corresponde a la medida del aislamiento a ruido aéreo del techo, donde A se calcula de acuerdo a la fórmula de Sabine, siendo V el volumen del local de recepción y T es el tiempo de reverberación (ISO 140-5, 1998):

$$A = \frac{0,16V}{T} \quad (4)$$

3.3. Magnitudes globales para la valoración del aislamiento a ruido aéreo

El método de comparación descrito en la norma ISO 717-1 permite convertir el aislamiento acústico obtenido en bandas de frecuencias de tercio de octava en un solo valor o magnitud global sea ésta la diferencia de nivel estandarizada global (D_{nTw}) o el índice de reducción sonora aparente global (R_{iw}). Estas magnitudes globales se calculan a partir de los valores de medida D_{nt} o R_i y los valores de referencia para el aislamiento a ruido aéreo en el rango de frecuencias de 100 Hz a 3150 Hz (Tabla 2). Con estos valores se obtienen las curvas de medida y la curva de referencia, esta última se desplaza en saltos de 1 dB hacia las curvas de medida hasta que la suma de las desviaciones desfavorables sea lo mayor posible pero no mayor a 32 dB (para mediciones en bandas de tercio de octava). El valor a 500 Hz en las curvas desplazadas es el valor global de D_{nTw} y R_{iw} .

3.3.1. Término de adaptación al espectro

El término de adaptación espectral (C o Ctr) es el valor en decibelios que se añade al valor de la magnitud global para tener en cuenta las características de un espectro de ruido particular: C cuando se calcula con el Espectro Nº 1 (ruido rosa) y Ctr cuando se calcula con el Espectro Nº 2 (ruido de tráfico urbano). El término de adaptación espectral C se calcula según la norma ISO 717-1 mediante la ecuación (8), donde X_w es el valor de la diferencia de nivel estandarizada global (D_{nTw}) o el índice de reducción sonora aparente global (R_{iw}). X_{Ai} se calcula según la ecuación (9), donde i es el índice para las bandas de 100Hz a 3150Hz, L_i son los niveles sonoros a la frecuencia i para el Espectro Nº1 (Tabla 3), X_i es la diferencia estanda-

TABLA 2. Valores de referencia para el aislamiento a ruido aéreo en frecuencias de tercio de octava

Frecuencia Hz	Valores de referencia ISO 717-1	Frecuencia Hz	Valores de referencia ISO 717-1	Frecuencia Hz	Valores de referencia ISO 717-1	Frecuencia Hz	Valores de referencia ISO 717-1
100	33	250	45	630	53	1600	56
125	36	315	48	800	54	2000	56
160	39	400	51	1000	55	2500	56
200	42	500	52	1250	56	3150	56

Fuente: ISO 717-1 (1996).

TABLA 3. Espectro de nivel sonoro para calcular el término de adaptación espectral

Frecuencia (Hz)	Li Espectro N°1	Frecuencia (Hz)	Li Espectro N°1
100	-29	630	-12
125	-26	800	-11
160	-23	1000	-10
200	-21	1250	-9
250	-19	1600	-9
315	-17	2000	-9
400	-15	2500	-9
500	-13	3150	-9

Fuente: norma ISO 717-1.

rizada de nivel sonoro (D_{nT}) o el índice de reducción sonora aparente (R_i) a la frecuencia de medida i dada, con una precisión de 0,1dB y redondeado al valor entero más próximo.

$$C = X_{Ai} - X_w \quad (5) \quad X_{Ai} = -10 \lg \sum 10^{(Li - Xi)/10} \quad (6)$$

Las magnitudes globales D_{nTw} y R_{iwr} , cuando se usa ruido rosa como fuente sonora deben expresarse con el término de adaptación espectral C entre paréntesis.

4. Resultados y discusión de resultados

Se diseñaron y construyeron tres prototipos de techos ecológicos multicapas con distintos materiales naturales como las especies vegetales Aloe barbadensis (Sábila) y Widelia Trilobata (Laurel) y sustratos de fibra de coco superpuestos sobre un techo base liviano, de bajo costo, impermeabilizado y con materiales antiraíces. Al sustrato se le varió su espesor de 10 a 20 cm, sus condiciones seca o húmeda y su densidad: 100% fibra de coco, 66% fibra de coco (con mezcla de 17% de capa vegetal y 17% de abono) y 33% fibra de coco (con mezcla de 33% de capa vegetal y 33% de abono).

En los resultados de los experimentos realizados bajo ensayo in situ se detectó que a mayor espesor y densidad del sustrato el aislamiento fue mayor. El sustrato en condiciones secas aisló más que en condiciones húmedas. Las especies vegetales y el sustrato con fibra de coco 100% no aportaron aislamiento acústico al sistema de techo. En la Figura 9 se detalla el aislamiento acústico de las superposiciones de las distintas multicapas de los tres prototipos de techos ecológicos.

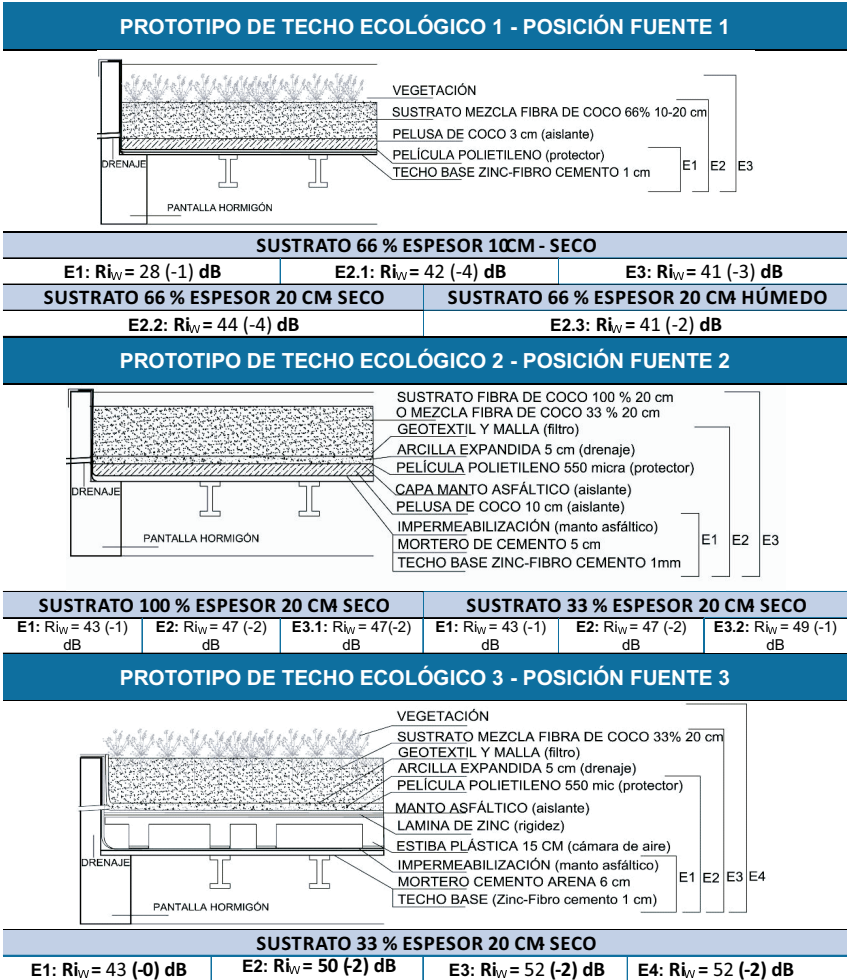


FIGURA 9. Prototipos de techos ecológicos multicapas

Fuente: Elaboración propia (2015).

En el Prototipo de Techo 1 se realizaron cinco ensayos de aislamiento acústico in situ (E1, E2.1, E2.2, E2.3 y E3). Analizando el valor global de aislamiento acústico R_{iw} se detectó que el techo base con su película protectora (ensayo E1) aisló 28 dB. Al adicionarle a éste la pelusa de coco y el sustrato de fibra de coco de 10 cm de espesor constituido por 66% fibra de coco, 17% capa vegetal y 17% abono (Ensayo E2.1) se incrementó el aislamiento a 42 dB. El ensayo E3 se realizó luego de sembrar sobre este sustrato la vegetación Aloe Barbadensis (Sábila) esperando tres meses para que se extienda en toda la superficie del techo, se observó que la vegetación aisló 41 dB, por lo tanto no aportó aislamiento al sistema; la mayor contribución fue la del sustrato, como se observa en la figura 10.

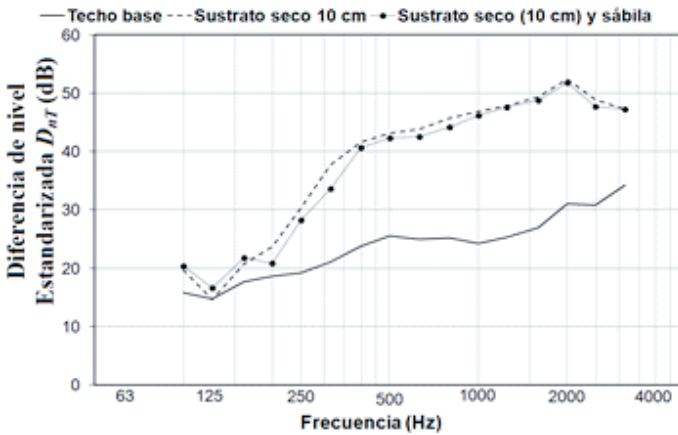


FIGURA 10. Aislamiento acústico analizando la Diferencia de Niveles Estandarizada a distintas frecuencias sonoras
Fuente: Elaboración propia.

El ensayo E2.2 se realizó al incrementarse el espesor del sustrato de fibra de coco a 20 cm sin la especie vegetal en condiciones secas, obteniéndose un aislamiento de 44 dB y en condición húmeda fue de 41 dB. Se observó que al aumentar el espesor del sustrato aumenta el aislamiento. En la Figura 11 se compara la diferencia de nivel estandarizado para dos espesores del sustrato de fibra de coco en condición seca, observándose que a medida que se incrementa el espesor aumenta el aislamiento, lo cual es visible a partir de los 200 Hz. Asimismo, el aislamiento acústico disminuye cuando aumenta la humedad del sustrato; en la Figura 12 se

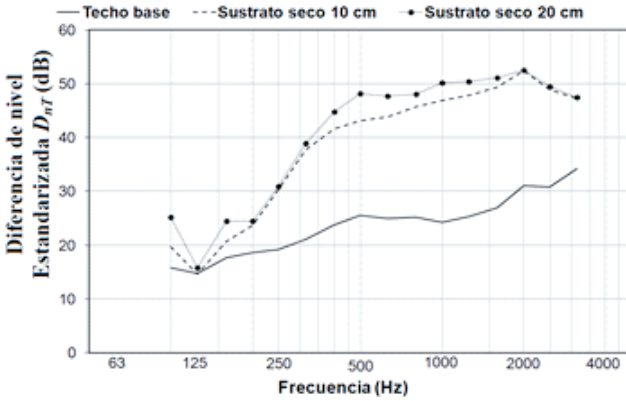


FIGURA 11. Aislamiento acústico analizando la Diferencia de Niveles Estandarizada a distintas frecuencias sonoras
Fuente: Elaboración propia.

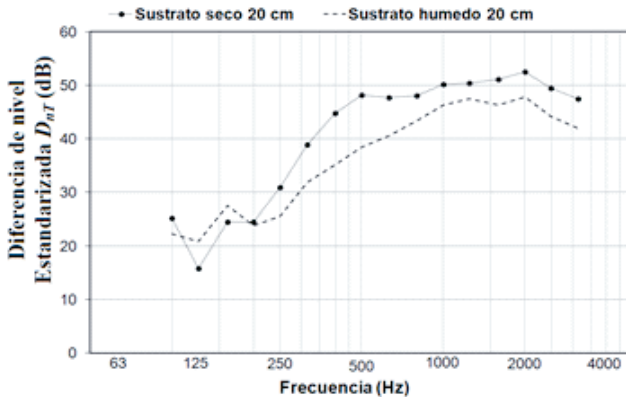


FIGURA 12. Gráfico comparativo Diferencia de Niveles Estandarizada
Fuente: Elaboración propia.

compara la diferencia de nivel estandarizada para ambas condiciones donde a medida que aumenta la frecuencia del sonido mejora el aislamiento del techo.

El Prototipo de Techo Ecológico 2 estuvo conformado por tres multicapas: la primera (techo base) es soporte y protector de la humedad; la segunda conformada por material aislante, de protección de humedad, dre-

naje y filtros; y la tercera constituida por un sustrato con mezcla de fibra de coco (fibra larga y aserrín, obtenida moliendo el mesocarpo del fruto de coco nucífera), capa vegetal (suelo franco arenoso) y abono orgánico (materia orgánica sedimentada en la desembocadura de los ríos), para cada multicapa se realizaron ensayos de aislamiento acústico in situ (E1, E2, E3.1 y E3.2). Analizando el valor global de aislamiento acústico R_{iw} se detectó que la primera multicapa o techo base (ensayo E1) aisló 43 dB. El ensayo E2 se realizó después de superponérsele al techo base la segunda multicapa la cual incrementó el aislamiento a 47 dB. El ensayo E3.1 se realizó luego de adicionarle a esta multicapa un sustrato de 100% fibra de coco de 20 cm de espesor en condiciones secas, el cual aisló 47 dB observándose que se comportó como la vegetación del Prototipo de Techo 1 al no aportar mayor aislamiento al sistema. El ensayo E3.2 se realizó al aumentar la densidad del sustrato en 33% fibra de coco, 33% capa vegetal y 33% de abono, observándose que el aislamiento se incrementó a 52 dB.

El Prototipo de Techo Ecológico 3 estuvo compuesto por tres multicapas y una capa de vegetación: la primera multicapa la constituye el techo base; la segunda compuesta por materiales reciclados y aislantes (entre ellos una cámara de aire); la tercera formada por materiales ecológicos que tienen la función de aislante, drenaje y sustento de la vegetación; y la última constituida por la vegetación *Widelia Trilobata* (Laurel). Para cada uno de ellas se realizaron ensayos de aislamiento acústico in situ (E1, E2, E3 y E4).

Analizando el valor global de aislamiento acústico R_{iw} se detectó que la primera multicapa o techo base (ensayo E1) aisló 43 dB. Al adicionarle a éste la segunda multicapa (ensayo E2) se incrementó el aislamiento a 50 dB y al superponerle la tercera multicapa o el material ecológico propuesto conformado por arcilla expandida, geotextil, malla antiáfido y sustrato con mezcla de 33,33 % fibra de coco, 33% capa vegetal y 33% de abono, de 20 cm de espesor en condición seca (Ensayo E3) se incrementó el aislamiento a 52 dB. El ensayo E4 se realizó luego de sembrar sobre este sustrato la vegetación *Widelia Trilobata*, observándose que aisló 52 dB en condición seca, es decir esta capa de vegetación no aportó aislamiento al sistema de techo multicapas.

Conclusiones y recomendaciones

Los techos ecológicos son una opción natural utilizada en ambientes externos que pueden mitigar los niveles de ruido inaceptables en áreas urbanas. El aislamiento acústico de los techos ecológicos ha sido un aspecto poco estudiado; en este trabajo se desarrolló una metodología para determinar el aislamiento acústico a ruido aéreo de los techos bajo ensayo in situ, adaptando la recomendada para fachadas por las normas internacionales ISO 140-5 e ISO 717-1. Esta metodología se aplicó a tres prototipos de techos multicapas diseñados y construidos con materiales ecológicos propios de la región tropical, entre ellos: la arcilla expandida, la pelusa de coco y la fibra de coco; esta última se utilizó como sustrato de dos especies vegetales autóctona de la región tropical: *Aloe barbadensis* (Sábila) y *Widelia trilobata* (Laurel). Se realizaron experimentos variando el espesor, las condiciones (seca o húmeda) y la densidad del sustrato de fibra de coco.

En el Laboratorio de Suelos y Aguas de la Universidad del Zulia se realizaron las pruebas de caracterización hidrofísica del sustrato de fibra de coco con diferentes densidades; el sustrato de menor densidad está constituido sólo con fibra de coco (100 %), se incrementó su densidad mezclándolo con otros materiales como capa vegetal y abono orgánico en diferentes proporciones de volúmenes 4:1:1 (66.7 % fibra de coco, 16.67 % capa vegetal, 16.67 % materia orgánica) y de 1:1:1 (33,33 % fibra de coco, 33,33 % capa vegetal, 33,33 % materia orgánica).

El Prototipo de Techo Ecológico 1 estuvo conformado por tres multicapas: la primera (techo base) con materiales de zinc-fibroemento y película de polietileno los cuales cumplen la función de soporte y protección de la humedad; la segunda compuesta por materiales ecológicos (pelusa de coco y fibra de coco de diferentes espesores) que tienen la función de aislante, drenaje y sustento de la especie vegetal, y la última es la vegetación en sí (*Aloe barbadensis*); todos estos materiales son autóctonos de la región tropical. Se realizaron experimentos con un sustrato de 66% de fibra de coco variando su espesor y condición.

Analizando el comportamiento acústico del prototipo de techo 1 en la condición seca, con una emisión sonora de 93,2 dB se observa que el techo base con su película protectora tiene un valor global R_{iw} de 28 dB, al adicionarle a éste la pelusa coco de 3 cm de espesor y el sustrato 10 cm

de espesor el aislamiento se incrementó a 42 dB. Al sembrar la vegetación *Aloe barbadensis* (sábila) sobre el sustrato de 10 cm no se incrementó el aislamiento, la mayor contribución fue la del sustrato. Al duplicarse el espesor del sustrato a 20 cm el aislamiento aumentó 2 dB, contrastando este resultado con teorías de referencia la ley de masa establece que la pérdida de transmisión sonora aumenta al incrementarse la masa y la frecuencia sonora sobre todo a partir de los 200 Hz.

Por otro lado, el sustrato de fibra de coco de 20 cm en condición seca aisló 44 dB y en condición húmeda el aislamiento disminuyó en 3 dB, debido a que la velocidad del sonido varía de acuerdo al medio donde se propague, siendo en el agua mayor que en el aire; la velocidad del sonido en el agua a una temperatura de 15°C es de 1.500m/s y en el aire a una temperatura de 20°C es de 344m/s.

En el Prototipo de Techo Ecológico 2 se realizaron experimentos variando la densidad del sustrato: 100 % y 33% fibra de coco. Estos sustratos de 20 cm de espesor en condición seca, se superpusieron sobre dos multicapas: la primera constituida por un techo base y la segunda conformada por materiales aislantes, de protección de la humedad, drenaje y filtro, consiguiéndose que el techo base con la interacción de una emisión sonora (LAeq) de 92,69 dB aisló 43 dB, al superponérsele la segunda multicapa el aislamiento fue de 47 dB y al adicionarle el sustrato 100% fibra de coco aisló 47 dB. Al aumentar la densidad del sustrato mezclando 33,33% fibra de coco, 33,33% capa vegetal, 33,33% materia orgánica, el aislamiento fue de 49 dB es decir se incrementó 2 dB. De esta manera, se comprobó que el sustrato 100% fibra de coco no aportó ningún aislamiento, siendo necesario aumentar su densidad para lograr mayor reducción sonora.

El Prototipo de Techo Ecológico 3 estuvo compuesto por tres multicapas y una capa de vegetación. La primera multicapa o techo base estuvo compuesto de materiales locales livianos y de bajo costo como: lámina metálica de zinc lisa galvanizada calibre 20 de espesor 95 mm y lámina de fibrocemento de 1 cm de espesor, con un acabado final de mortero de cemento (arena y cemento) de 5 cm con una pendiente del 1%. Esta misma configuración de techo base lo posee el Prototipo de Techo 2.

La segunda multicapa compuesta por materiales reciclados y aislantes, como son: una estiba plástica con cámara de aire de 15 cm, en su base se colocó neoprene para aislarla del techo. Sobre la estiba perforada se co-

locaron láminas rígidas de zinc galvanizadas calibre 26 de espesor 45 mm, solapadas 3 cm con una banda de goma reciclada de 2 mm de espesor para no dejar rendijas, encima de éstas se colocó un manto asfáltico de 3,2 mm que actúa como aislante. Como capa final se cubrió el techo y la pantalla de hormigón con una película de polietileno de 500 micras de espesor para protegerlas de la humedad del sustrato, a su vez está conectada al drenaje del techo.

La tercera multicapa está compuesta por materiales ecológicos como: arcilla expandida de 5 cm de espesor que cumple la función de drenaje y depósito de la humedad, sobre ésta se colocó un geotextil y una malla antiáfido que actúan como filtro del sustrato y antiraíces. La siguiente multicapa es el sustrato de 20 cm de espesor con mezcla de fibra de coco virgen, capa vegetal y abono orgánico en una proporción de volumen 1:1:1 (33,33% fibra de coco, 33,33% capa vegetal, 33,33% materia orgánica). Se realizaron pruebas de caracterización hidrofísicas al sustrato.

Como última capa se colocó la especie vegetal *Widelia Trilobata* (Laurel), es una planta herbácea del trópico húmedo excelente para cobertura vegetal que crece en condiciones de clima cálido y seco, es nativa de América tropical, de fácil propagación, perenne, rastrera, siempre verde, profusamente ramificada y cubre grandes extensiones.

Analizando el comportamiento acústico del prototipo de techo ecológico 3, con la interacción de una emisión sonora (LAeq) de 95,4 dB en bandas de frecuencia de 1/3 de octavas, se determinó que: el techo base tiene un valor global RiW de 43 dB, al adicionarle a éste la multicapa cámara de aire, lamina de zinc, manto asfáltico y película de polietileno se incrementó el aislamiento a un RiW de 50 dB y al superponerle el material ecológico propuesto conformado por arcilla expandida, geotextil, malla antiáfido y sustrato con mezcla de fibra de coco 33,33% de 20 cm de espesor, se incrementó el aislamiento a un RiW de 52 dB. Con la vegetación *Widelia Trilobata* (Laurel) sobre el sustrato de 20 cm (Ensayo E4) no se incrementó el aislamiento, la mayor contribución fue la del sustrato con cámara de aire, esto es visible a partir de los 200 Hz.

Las pruebas de caracterización hidrofísica del sustrato de fibra de coco con diferentes densidades, realizadas en el Laboratorio de Suelos y Aguas de la Universidad del Zulia, presentaron excelentes propiedades porque permiten retener y aportar a las plantas un volumen de agua den-

tro de un rango óptimo así como una porosidad de aireación que permite el intercambio gaseoso del sustrato, garantizando una buena suplencia de oxígeno a las raíces así como la salida del dióxido de carbono del sustrato. En el ámbito de la construcción, siguiendo la línea ecológica, uno de los aspectos importantes es introducir el empleo de los materiales de procedencia local como la fibra de coco que es un material de desecho agrícola, de menor costo, reduce el uso de materias sintéticas no degradables y es utilizado como sustento de crecimiento para la vegetación.

Por otra parte, aunque las especies vegetales *Aloe barbadensis* y *Widelia trilobata* (Laurel) no aportaron aislamiento acústico al sistema de techo ecológico multicapas, se sugiere su uso porque producen efectos estéticos que realzan la habitabilidad de un lugar. Además, ayudan a compensar la falta de áreas verdes en las ciudades, integrando de esta forma las edificaciones al entorno natural. Estas especies presentan muchas ventajas: la especie vegetal *Aloe barbadensis* (Sábila) requiere un mínimo mantenimiento, es perenne, con tolerancia a períodos de sequía y condiciones estresantes de alta irradiación, está asociada a coberturas extensivas con profundidades de sustrato menores a 15 cm. La especie vegetal *Widelia trilobata* (Laurel) es una planta herbácea del trópico húmedo que crece en condiciones de clima cálido y seco, es nativa de América tropical, de fácil propagación, perenne, rastrera, siempre verde, profusamente ramificada y cubre grandes extensiones.

De acuerdo a lo expresado, la presente investigación ha proporcionado una serie de aportes a la medición del aislamiento acústico a ruido aéreo para techos verdes multicapas bajo ensayos in situ; las particiones multicapas están compuestas por capas delgadas de distintos materiales y cada vez que el sonido pasa a través de un material diferente, su nivel se reduce. Por este motivo se sugiere el uso de esta tecnología de techos para incrementar la masa y la pérdida de transmisión sonora en todas las frecuencias, reducir costos, peso y restricciones de espacios. Por último, es importante destacar que el empleo de los materiales de procedencia local como los utilizados en esta investigación fomenta el respeto por la naturaleza, producen un menor impacto ambiental, lo que conlleva a la protección del planeta y de la vida presente y futura.

Referencias

- Alfaro, José María (2015). *Arquitectura sostenible*. Fecha de consulta: 01/01/2015
<http://arquitecturasostenible.blogspot.com>
- Arau, Higini (1999). *ABC de la Acústica Arquitectónica*. Ediciones CEAC. España.
- Briz, 2004 Briz, J. (2004). *Naturación Urbana. Cubiertas ecológicas y mejora medioambiental*. Comunicación impresa SL. España.
- Colegio oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia (2008). *Guía de Materiales para una Construcción Sostenibles*. Edita A. Murcia.
- Connelly, M. y Hodgson, M. (2008). *Sound Transmission Loss of Green Roofs. Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference awards y trade show*. Baltimore.
- Dinsdale, S., Pearen, B. y Wilson, C. (2006). *Feasibility Study for Green Roof Application on Queen's University Campus*. Fecha de consulta: 14/01/2015, de Queen's Physical Plant Services: <http://www.queen-su.ca/pps/reports/greenroof.pdf>
- Ecoticias (2013). *Los techos verdes en entornos urbanos ayudan a reducir el ruido*. Fecha de consulta: 14/01/2015, <http://www.ecoticias.com/bio-construccion/80369/techos-verdes-entornos-urbanos-ayudan-reducir-ruido>
- Edwards, B. (2009). *Guía básica de la sostenibilidad*. Editorial Gustavo Gili SL. Barcelona.
- Environmental Affairs Department City of Los Angeles. (2007). *Green Roofs-Cooling Los Angeles A Resource Guide*. Fecha de consulta: 14/01/2015, <http://www.slideshare.net/Fujita64g/t1g369>
- ISO 140-5 (1998). *Norma Internacional: Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de edificios Parte 5: mediciones in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachadas y de fachadas*.
- ISO 717-1 (1996). *Norma Internacional: Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo*.
- Getter, K., Rowe, D. y Andresen, J. (2007). *Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention*. *Ecological Engineering*, 31, 225-231.
- Glass, C. (2007). *Green Roof Water Quality and Quantity Monitoring*. American Society of Landscape Architects. Fecha de consulta: 14/01/2015, <http://www.asla.org/search.aspx?q=Green%20Roof%20Water%20Quality%20and%20Quantity%20Monitoring>

- Glé, P., Gourdon, E. y Laurent, A. (2011). Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity. *Applied Acoustics*, 72, 249-259.
- Hosseini, F. M., Ayub, M. y Nor, M. (2011). Analysis of coir fiber acoustical characteristics. *Applied Acoustics*, 72 (1), 35-42.
- Lin, Y. J. y Lin, H. T. (2011). Thermal performance of different planting substrates and irrigation frequencies in extensive tropical rooftop greeneries. *Building and Environment*, 46, 345-355.
- Nicholas, S., Williams, A., Rayner, J. y Raynor, K. (2010). Green roofs for a wide brown land. Opportunities and barriers for rooftop greening in Australia. *Urban Forestry y Urban Greening*, 9, 245-251.
- Recuero, M. (1999). *Acústica Arquitectónica Aplicada*. Editorial Paraninfo. Madrid.
- Rossing, T. (2007). *Springer Handbook of Acoustics*. Springer. USA.
- Van Renterghem, T. y Botteldooren, D. (2009). Reducing the acoustical facade load from road traffic with Green roofs. *Building and Environment*, 44, 1081-1087.
- Wira, A., Mohd, R. y Abd, J. (2011). Composts as additives in coconut coir dust culture for growing rockmelon (*Cucumis melo* L.). *J. Trop. Agric. and Fd. Sc.*, 39 (2), 229-237.
- Wong, N., Tan, A., Tan, P., Chiang, K. y Wong, N. (2010). Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, 45, 411-420.