

## Desarrollo experimental de un prototipo del sistema de tubos enterrados

Ernesto Lorenzo / María Elena Hobaica / Antonio Conti  
 Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción-IDEC  
 Facultad de Arquitectura y Urbanismo-Universidad Central de Venezuela

### Resumen

El presente trabajo describe la construcción de un prototipo experimental con la técnica de climatización pasiva a través de tubos enterrados. Se elaboró un plan de experimentaciones con el objetivo de corroborar en la práctica el funcionamiento de este sistema y sus posibilidades de alcanzar rangos de confort adecuado en clima moderado húmedo. Los resultados parciales indican la factibilidad de la técnica en el mejoramiento de las condiciones térmicas interiores de las edificaciones, a la vez que se reduce su consumo energético por concepto de climatización.

### Abstract

*This article describes the construction of an experimental prototype for passive air-conditioning through buried pipes, in order to corroborate the practical functioning of this system and its ability to achieve thermal comfort ranges in moderate humid climate. Partial results were obtained indicating the feasibility of the technique in improving the thermal conditions of buildings, while reducing their energy consumption for air conditioning.*

En arquitectura, hoy por hoy, es de gran utilidad el desarrollo de instrumentos para promover el diseño de edificaciones térmicamente confortables a través del uso racional de la energía, mediante el desarrollo de técnicas de diseño y de acondicionamiento pasivo adecuadas al clima, así como es igualmente una necesidad planificar recomendaciones de aplicación de estas técnicas y mecanismos de difusión de los beneficios destinados a los profesionales de la arquitectura y la construcción, así como a los usuarios. Con base en estas premisas se ha abordado el análisis de técnicas de enfriamiento pasivo de edificaciones, ya conocidas en otras latitudes, potencialmente eficientes para su aplicación en zonas climáticas de Venezuela. Así mismo se ha diseñado un soporte experimental con la finalidad de llevar a cabo experiencias empíricas en zonas específicas de Venezuela que sirvan como parámetro de apreciación de las técnicas seleccionadas y para determinar la viabilidad de un instrumento metodológico desarrollado en el "Laboratoire d'Étude des Phénomènes de Transfert et de l'Instantanéité: Agro-industrie et Bâtiment" (LEPTIAB) de la Universidad de La Rochelle en Francia, que evalúa el potencial de técnicas pasivas de enfriamiento de espacios de edificaciones en función del clima.

En una primera fase se obtienen conclusiones sobre la calidad del instrumento metodológico y la técnica pasiva objeto de experimentación, en cuanto en su factibilidad de aplicación, particularizando para cuál de las zonas climáticas es apta. Los resultados permiten la aplicación

### Descriptores

Climatización pasiva, Sistema de tubos enterrados, Ahorro energético, Mejoramiento de condiciones térmicas de la vivienda.

### Keywords:

*passive air conditioning, buried pipes, energy savings, sustainability.*

TECNOLOGÍA Y CONSTRUCCIÓN | Vol. 24-I | 2008 |  
 pp. 43-50 | Recibido el 16/06/08 | Aceptado el 18/07/08

del instrumento a otras técnicas pasivas y otras zonas climáticas del país. Se obtiene así en una primera instancia información sobre el estado del arte y aplicabilidad en el trópico de los sistemas referidos previamente.

En la práctica se diseñó el soporte experimental con miras a la elaboración del primer prototipo en una zona de las afueras de Caracas, el núcleo universitario Jaime Henao Jaramillo situado en El Laurel, mediante la aplicación de la técnica de enfriamiento por conductos enterrados, la cual fue previamente catalogada de acuerdo a la metodología reseñada como la de mayor aptitud para las zonas climáticas determinadas en Venezuela.

Las conclusiones sobre la calidad del instrumento metodológico y la técnica pasiva experimentada permiten abordar en el corto y el mediano plazo el estudio de diversos sistemas de enfriamiento con miras a su aplicabilidad en edificaciones, con el objeto de proporcionar grados elevados de confort con un ahorro considerable de energía. Es un indudable aporte aunque a pequeña escala para detener la contaminación y el cambio climático, fenómenos a los cuales contribuyen las edificaciones en elevada proporción.

### **Planteamiento del problema: pertinencia de los conductos enterrados**

En la mayoría de las ciudades los sistemas de climatización activa se han convertido en mecanismos de uso frecuente –en ocasiones abusivo– en la construcción formal, lo cual hace de gran parte de las edificaciones grandes consumidoras de energía a lo largo del ciclo de vida de la edificación, además de emitir gases cuyo efecto “invernadero” se ha acrecentado en la medida en que han aumentado las necesidades de enfriamiento y por ende la demanda de una de las fuentes de energía más importantes, la industria eléctrica.

Los países industrializados pioneros en la reducción del consumo energético han puesto a disposición del mercado un número importante de técnicas pasivas e híbridas cuya característica es una integración estrecha con la dinámica de la envolvente de la edificación.

Entre las técnicas de enfriamiento pasivo más extendidas actualmente podemos señalar la ventilación nocturna, el enfriamiento por el suelo, el enfriamiento de cerramientos por el aire, enfriamiento por evaporación,

enfriamiento por des-humidificación, entresijos enfriados con agua, plafones refrescantes y ventilación por desplazamiento, enfriamiento por aire del subsuelo, etc.

Muchas de estas técnicas son híbridos que combinan lo pasivo con lo activo por lo que una separación absoluta presenta dificultades: lo importante es mantener los objetivos y buscar su cumplimiento.

Desde hace algunos años se han desarrollado diversos estudios sobre la integración de sistemas especiales de control ambiental, los cuales se basan en el tratamiento inter-relacionado de los componentes arquitectónicos a fin de cubrir los requerimientos de habitabilidad de las edificaciones.

La utilización de técnicas pasivas en climas cálidos secos se ha extendido con mayor rapidez que en el trópico húmedo. La incompreensión en nuestros países de las especificidades de uno y otro clima ha dado como resultado el diseño indiscriminado y en algunos casos la utilización distorsionada de técnicas inadecuadas que incrementan el malestar térmico o inconfort. De allí que hayamos emprendido una línea de investigación que aborda la adaptación de una metodología de cálculo del potencial de sistemas pasivos en zonas climáticas propias del trópico húmedo. La metodología en cuestión desarrollada en el LEPTIAB de la Universidad de La Rochelle ha sido adaptada conjuntamente para su aplicación en edificaciones en zonas climáticas de Venezuela. Su incorporación como parte de un programa de evaluación térmica de edificaciones permite conocer –además de su potencial para la zona– la posible economía por ahorro de energía (Hobaica, 2001).

La aplicación del método del potencial de técnicas pasivas arrojó resultados muy favorables sobre la posible utilización del sistema de enfriamiento de conductos enterrados en todas las zonas climáticas de Venezuela. Estos tubos que utilizan el poder de la inercia de la tierra para enfriar el aire que circula por ellos e insuflarlo en los ambientes internos comenzaron desde hace algún tiempo a ser seriamente considerados en climas cálidos húmedos por ser relativamente sencillos de implementar y accesibles en cuanto a costos. De allí que hayan sido seleccionados para un plan piloto cuya ejecución es parte de un trabajo de fin de estudios de postgrado del IDEC (Lorenzo, 2007).

A partir del estudio de una porción del estado del arte de la tecnología correspondiente a los conductos enterrados se evidenciaron vacíos en la información relativa a estos sistemas, particularmente en los procedimientos de

cálculo y dimensionado de los sistemas de tubos enterrados. Igualmente se observó en buena parte de las aplicaciones consultadas la forma empírica de diseñar y construir estos sistemas con una buena dosis intuitiva y con poca rigurosidad científica. Así mismo se evidenció la ausencia tanto de estudios teóricos como de aplicaciones prácticas en nuestro país que documentaran el comportamiento del sistema de tubos enterrados en alguna de las distintas zonas climáticas.

En virtud de dichos hallazgos se decidió impulsar un plan de desarrollo de sistemas pasivos de enfriamientos de edificaciones cuya primera etapa consistió en un prototipo que nos permitiera verificar y documentar de manera experimental el comportamiento del sistema de tubos enterrados, específicamente en climas cálido-húmedo como el de la ciudad de Caracas, en Venezuela.

Las experimentaciones in situ pretenden validar progresivamente un método desarrollado en la Universidad de La Rochelle en Francia con el fin de determinar el potencial de técnicas pasivas de enfriamiento en zonas cálidas. Esta verificación es aún más necesaria cuando el enfoque del cálculo utilizado para el dimensionado del prototipo y el proyecto de aplicación en general se desarrolla en condiciones climáticas estacionarias (no dinámicas), lo que conduce a simplificaciones con el fin de predecir de manera simple ciertas condiciones térmicas dentro del tubo, así como su comportamiento aproximado con unos márgenes de error aceptables.

El desarrollo del prototipo se llevó a cabo en la planta experimental del IDEC ubicada en una zona montañosa

denominada El Laurel, al sureste de la ciudad de Caracas, donde predomina durante la mayor parte del año un clima de moderado a cálido-húmedo.

Por tratarse de un sistema que debe ser diseñado en función de las características propias del lugar donde será construido, se planteó durante el desarrollo del prototipo dos fases complementarias. La primera consistió en la recopilación y documentación de las características propias del lugar (datos hidrométricos y de temperatura, tanto exterior como del suelo), lo que nos permitió realizar un diseño teórico adecuado en función de los datos obtenidos. La segunda fase comprendió la construcción total del sistema y su puesta en marcha. Durante ambas fases se utilizaron equipos de medición especializados que avalan los resultados presentados a lo largo de éste capítulo.

## Experimentación con tubos enterrados

### A) Fase de estudio

En la fase preliminar se realizaron cuatro mediciones simultáneas de la temperatura de la tierra cada medio metro, desde 50 cm hasta llegar a los dos metros de profundidad. En paralelo se tomaron registros de la temperatura del aire exterior para así verificar las diferenciaciones existentes. Todos los registros de la temperatura llevados a cabo en esta primera fase de la experimentación fueron realizados durante los meses de junio y julio del año 2006 (ver foto 1 y gráfico 2).

Foto 1  
Colocación de sensores para el registro de la temperatura del subsuelo a 50, 100, 150 y 200 cm



Fuente: Arq. Ernesto Lorenzo Romero IDEC-FAU-UCV.

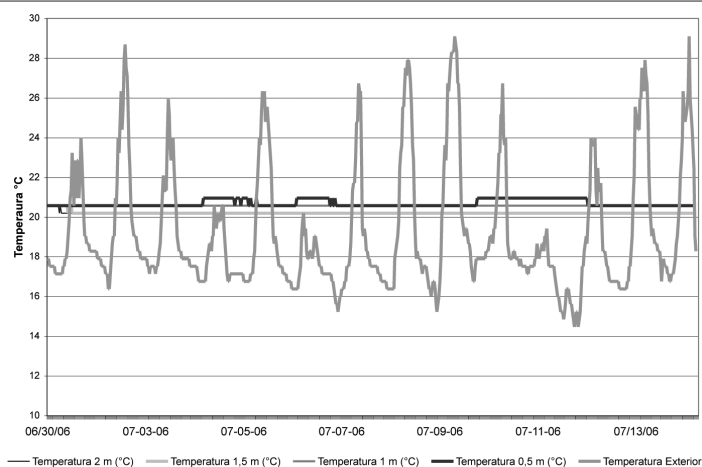
Como se observa en el gráfico 2, las temperaturas del suelo obtenidas a los distintos niveles de profundidad son en general muy estables entre sí, sin embargo mantienen pequeñas variaciones cuanto más nos acercamos a la superficie. De igual forma, en todos los casos entre la tierra y el aire exterior se logran diferencias de temperatura cercanas a los 9°C. Estos resultados, positivos por demás, evidenciaron que existe un potencial de aplicación importante en la zona estudiada, por lo cual se procedió a la construcción del prototipo.

**B) Fase de construcción**

El proceso de construcción del prototipo se realizó durante el mes de noviembre de 2006, y el monitoreo y la documentación del comportamiento del sistema se realizó hasta el mes de abril de 2007.

A partir de los cálculos y el pre-dimensionamiento, en esta fase se iniciaron los trabajos mediante la realización de una zanja de dos metros de profundidad y treinta metros de largo, para poder acceder a la temperatura deseada y encontrada en la fase previa. Ver foto 2.

Gráfico 1  
Resultado de las mediciones *in situ*



Fuente: Arq. Ernesto Lorenzo Romero IDEC-FAU-UCV.

Foto 2  
Excavación de la zanja de 2 m. de profundidad y 30 m. de largo. Tubos PVC de Ø 4" y 6"



Fuente: Arq. Ernesto Lorenzo Romero IDEC-FAU-UCV.

Una vez culminada la zanja se colocaron tres tubos de PVC, con diámetros y longitudes distintas. El primero fue de Ø 4" y 30 m de longitud, los otros dos fueron de Ø 4" y Ø 6" con 15 metros de longitud cada uno. La separación mínima entre cada tubo fue de 5 cm, para garantizar la disipación del calor en la tierra. Ver foto 3.

Seguidamente los tubos se cubrieron por completo hasta el nivel original del terreno y se colocaron 6 sensores que se encargarían de registrar cada 15 minutos las cuatro temperaturas del suelo, del aire exterior y del aire al final de los tubos. Igualmente se colocaron sensores para el registro de la humedad exterior y a la salida de los tubos.

Finalmente, para garantizar el recorrido constante del aire dentro del tubo, se utilizaron ventiladores de Ø 8" con tres velocidades regulables (2 m/s, 5m/s y 7m/s). Ver fotos 4 y 5.

### Interpretación de los resultados experimentales

Una vez realizadas mediciones continuas cada 15 min y durante cinco meses consecutivos, se obtuvieron resultados muy satisfactorios que demuestran el gran potencial de esta tecnología en climas moderado-húmedo como el de Caracas. Con esta experiencia se puso en camino la primera etapa de trabajo para la validación de la metodología del potencial de sistemas pasivos desarrollada en el LEPTIAB de la Universidad de La Rochelle y su factibilidad de aplicación en nuestro país.

Progresivamente esta metodología se aplicará en distintas zonas climáticas de Venezuela con miras al traspaso de los resultados y conclusiones de las investigaciones a la producción de edificaciones ahorrativas en gasto energético.

Foto 3  
Colocación de los tubos



Foto 4  
Instalación de sensores dentro de los tubos



Foto 5  
Colocación de ventiladores y medición velocidad del caudal



Fuente: Arq. Ernesto Lorenzo Romero IDEC-FAU-UCV.

En el gráfico 2 se puede observar que en los tres casos experimentados, el tubo de menor diámetro y mayor longitud fue el que tuvo el comportamiento más eficiente a lo largo del periodo de experimentación, lográndose una reducción de la temperatura de hasta -10°C con respecto a los momentos más calurosos registrados durante el día. También se observó que cuando la temperatura exterior comienza a bajar –por lo general durante la madrugada– se registra un calentamiento del aire dentro del tubo.

Igualmente, en el gráfico 3 se puede observar que la humedad absoluta del aire dentro de los tubos es muy similar a la humedad absoluta exterior, corroborando así que el aire no llega a enfriarse lo suficiente como para llegar a la temperatura de rocío, por lo cual no incrementa ni disminuye la humedad a lo largo de su recorrido.

Gráfico 2  
Temperaturas registradas durante la experimentación, dentro y fuera de los tubos

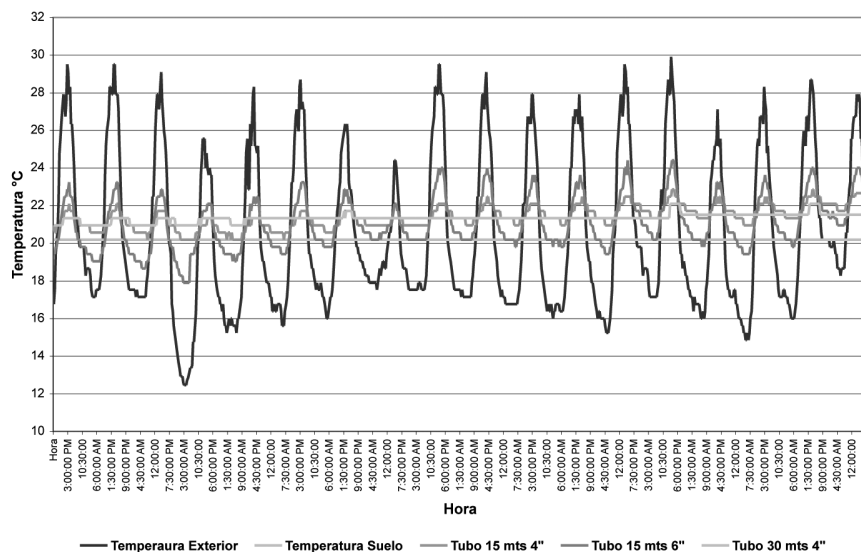
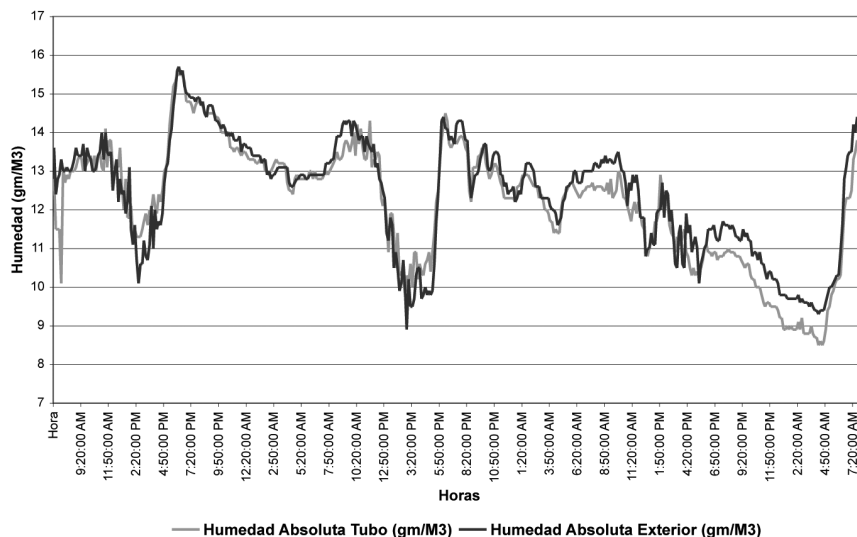


Gráfico 3  
Humedad absoluta registrada durante la experimentación, dentro y fuera de los tubos



Fuente: Arq. Ernesto Lorenzo Romero IDEC-FAU-UCV.

## Conclusiones

Los resultados de las mediciones permitieron evaluar detalladamente el comportamiento real de este sistema en climas cálido-húmedo, arrojando conclusiones precisas de gran interés.

1. Hasta los dos primeros metros de profundidad la temperatura del suelo será más baja cuanto más se profundice. Los resultados más significativos en cuanto a diferencia de temperatura exterior-interior del suelo se obtuvieron entre los 1,8 metros y 2 metros de profundidad. Las lecturas recabadas a los dos metros han sido completamente estables a lo largo de la experimentación lo que permite inferir que pasados los dos metros de profundidad la temperatura local es estable y constante lo cual coincide con los datos que arroja la literatura existente.

2. Para zonas con temperaturas elevadas la superficie exterior a lo largo de donde se encuentran los tubos puede tratarse para modificar las condiciones naturales incrementando la diferencia de temperatura entre el medio ambiente exterior y la del suelo. El sombreado, sembrado y regado son estrategias favorables para reducir la temperatura de la tierra y evitar al mismo tiempo la saturación del intercambio calórico del suelo alrededor de los tubos (debido a la cesión de calor desde los tubos hacia el suelo).

3. La disminución del caudal interno de los tubos aumenta la eficiencia de la técnica. Ahora bien, si el caudal de aire es muy bajo el volumen de aire de salida disminuye considerablemente, con lo cual es imperativo hacer los respectivos cálculos de suministro a los ambientes a la hora del traspaso y la aplicación de la técnica al entorno construido.

4. El diámetro de los tubos es una variable importante para los resultados, puesto que aumenta la eficiencia de forma considerable. La investigación experimental demuestra que tubos con diámetros menores aceleran la pérdida de carga calórica permitiendo aumentar la velocidad del aire dentro de los tubos e incrementar así el volumen de salida.

5. La longitud total de los tubos, tal como se había diagnosticado previamente en el estudio teórico, es un parámetro muy importante sobre todo para longitudes de tubo superiores a 30 m. Combinados con caudales pequeños, como por ejemplo con tubos de 10 cm de diámetro, las eficiencias resultantes están próximas a la unidad.

En resumen y a los efectos de manejo de variables para el diseño de sistemas de acondicionamiento pasivo

ambiental con tubos enterrados, se puede afirmar que la eficiencia del intercambio calórico aumenta cuando:

- a) aumenta la profundidad.
- b) disminuye el diámetro del tubo.
- c) aumenta la longitud de tubo.
- d) disminuye el caudal.

De igual forma se comprueba que por no registrarse dentro del tubo temperaturas cercanas a la de rocío, el aire que es introducido desde el exterior no sufre ninguna variación de los niveles de humedad absoluta originales, lo que da respuesta a las interrogantes surgidas durante el estudio del estado del arte en cuanto al supuesto de posibles condensaciones al interior de los tubos enterrados.

Los resultados obtenidos dan cuenta de temperaturas que se mantienen dentro de rangos de confort, obtenidas con los distintos tipos de tubos, de distintas longitudes y diámetros, lo cual nos alienta a proponer un proyecto para ensayar sus bondades en otras zonas climáticas venezolanas, especialmente en las más calientes, para corroborar el grado de cobertura teórico y confort ambiental de los tubos enterrados.

El refrescamiento de ambientes por medio de la técnica de tubos enterrados presenta otras ventajas a tener en cuenta como son: su simplicidad, flexibilidad y capacidad para ser combinada con otras técnicas e integrada con un diseño racional de la envolvente de la edificación. Por lo demás, en un clima sin grandes oscilaciones como es el que caracteriza a buena parte del país, se puede aprovechar la elevada inercia térmica del suelo durante todo el año con la seguridad de que con algunas excepciones, éste en general cumple con las condiciones de mantener una temperatura constante y baja, lo que lo caracteriza y avala como fuente eficiente de enfriamiento del fluido portador de calor que en este caso es el aire que circula por los tubos.

Finalmente, los tubos enterrados, como medios pasivos de enfriamiento del aire en el trópico, factibles desde el punto de vista constructivo, económicos y de muy bajo impacto ambiental, se revelan como técnicas con suficientes atributos como para planear su utilización en las zonas climáticas más calurosas del territorio nacional. Por tal motivo el equipo del área de habitabilidad del IDEC ha asumido el tema del enfriamiento sensible con tubos enterrados como parte esencial de la línea de investigación de habitabilidad e instrumento copartícipe para la disminución del gasto y la eficiencia de la demanda energética.

## Referencias

- Allard, F. y Belarbi R. (1998). Metodología de evaluación de técnicas pasivas de enfriamiento. COTEDI'98, Caracas.
- Belarbi, R. (1998). Développement d'outils méthodologiques d'évaluation et d'intégration des systems évaporatifs pour le rafraichissement passif des batiments. Tesis de Doctorado en Ingeniería Civil. Universidad de La Rochelle. Francia.
- Belarbi, R., Hobaica, M. E. y Rosales, L. (2001). "Los sistemas pasivos de refrescamiento de edificaciones en clima tropical húmedo, posibilidades de aplicación en Venezuela". *Tecnología y Construcción* 17-1, 57- 68. Caracas: IDEC/FAU/UCV.
- Cilento, A. (1999). *Cambio de paradigma del hábitat*. Caracas: Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela (CDCH-UCV).
- Givoni, B. (1978). *El hombre, la arquitectura y el clima*. París: Éditions du Moniteur.
- González, E. (2003). *Sistemas pasivos de climatización: Enfriamiento natural*. Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño (IIFA) de la Universidad del Zulia (LUZ). VII Encuentro sobre Confort del Ambiente Construido. EN-CAC – COTEDI 2003.
- Hobaica, M. E. (1984). Caracterización de zonas climáticas de Venezuela para la concepción térmica de edificaciones. Trabajo de fin de estudios de Maestría en Ciencias y técnicas de la Construcción. (DEA). París: École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Hobaica, M. E. (1991). Definición y validación experimental de un modelo térmico de edificaciones en clima tropical. Tesis de Doctorado. Universidad Pierre et Marie Curie. París VI, Francia.
- Hobaica M. E.; Allard, F. et al. (2007). Integración de Sistemas Pasivos de Acondicionamiento Térmico en Venezuela (ISPAVEN). Programa de Cooperación Interuniversitario. PCU-FONACIT-ECOSNORD. Compromiso 9269. Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC) Facultad de Arquitectura y Urbanismo. (FAU) Universidad Central de Venezuela. (UCV). Laboratorio de Estudio de Fenómenos de Transferencia aplicados a la Edificación (LEPTAB) Polo Ciencias y Tecnología. Universidad de La Rochelle. Francia.
- Lorenzo Romero, E. (2007). Climatización pasiva por conductos enterrados. Caso de aplicación: Almacenes L & G para bebidas alcohólicas y gaseosas. Trabajo especial de grado. Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC) de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU), Universidad Central de Venezuela (UCV). Caracas.