



MUROS Y CUBIERTAS EXPERIMENTALES DE HORMIGÓN DE TIERRA ESTABILIZADA EN XOCHIMILCO, MÉXICO

Luis Guerrero, Francisco Javier Soria López, Mario Larrondo Shiels

División de Ciencias y Artes para el Diseño. Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco
Calzada del Hueso 1100 Edificio P. 1er. Piso. Col. Villa Quietud, Coyoacán, 04980, México D.F.
Tel. (+52) 55 5283-7236 E-mail: lfgbaca@correo.xoc.uam.mx

Palabras clave: hormigón de tierra, estabilización de suelos, cubiertas ligeras

Resumen

Con el fin de evaluar comparativamente diversos procesos constructivos con tierra y especialmente analizar el potencial de aplicación de la técnica del hormigón de tierra estabilizada, en 2010 se inició la construcción de un edificio experimental en terrenos adjudicados a la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, al sur de la Ciudad de México. El inmueble se concluyó en agosto del 2012 y se pudo documentar tanto la realización de muros de carga como de cubiertas ligeras en forma de paraboloides hiperbólicos, reforzadas con mallas metálicas, habiendo utilizado tierra estabilizada con cemento y con cal.

El edificio experimental forma parte de un proyecto más amplio de apoyo a la docencia e investigación de la Universidad, en el que se desarrollará un centro de experimentación sobre edificación sustentable donde la construcción con tierra será una de las líneas prioritarias. En la presente ponencia se examina el proceso de edificación a fin de ofrecer datos objetivamente verificables acerca de las posibilidades de empleo de esta técnica constructiva en otras regiones.

Se detallan los antecedentes de la aplicación de tierra en estado plástico desde la época prehispánica en México, algunos datos sobre experiencias preliminares y el desarrollo del prototipo cuya edificación permitió mostrar la viabilidad técnica del sistema constructivo y, sobre todo, los valores que se derivan de su facilidad de implementación y velocidad de materialización.

1. INTRODUCCIÓN

La edificación con tierra tuvo un amplio desarrollo en todo el territorio mexicano desde el origen de las grandes civilizaciones prehispánicas. Ciudades monumentales tan destacadas como Teotihuacán, Monte Albán, Xochicalco, Cacaxtla, Cholula y Tula, por sólo nombrar las más conocidas a nivel internacional, poseen destacadas estructuras que fueron edificadas con adobe y tierra compactada.

Sin embargo, en la región norte de lo que en la actualidad conforma el territorio nacional, específicamente en las zonas serranas de los estados de Sonora, Chihuahua y Durango florecieron asentamientos en los que, en vez de emplear estas dos técnicas constructivas, se utilizaba el barro en estado plástico, para edificar notables conjuntos habitacionales, insertos en abrigos rocosos de laderas montañosas (Gamboa; Guerrero, 2013).

Estos conjuntos edilicios llegan a presentar hasta tres niveles de altura con entresijos y techos contruidos con viguerías, terrado y embarrado, conformando lo que se conoce como "Casas en Acantilado" o *Cliff Dwellings*, como las llaman los arqueólogos de Estados Unidos, en cuyo territorio también se localizan restos asociados culturalmente a los casos mexicanos (Cruz, 2007, p.31).

Dicho sistema constructivo, que podría llamarse *concreto ciclópeo de tierra*, es muy semejante a la técnica conocida internacionalmente como *cob*, pero difiere ligeramente de ésta porque en vez de emplearse fibras vegetales para su estabilización, se utilizaron componentes de granulometría superior a la grava.

La tierra se trabajaba con un alto nivel de humedad, en combinación con piedras de diferentes tamaños para configurar hiladas constructivas. En los vestigios arqueológicos se

evidencia un gran cuidado en el acomodo de estas rocas, de tal manera que las partes bajas de los muros, que normalmente son más anchas, presentan piedras de mayor tamaño (entre 15 y 20cm), el cual disminuye gradualmente conforme se elevan y angostan las paredes



Figura 1. Casas en acantilado en las Cuevas del Embudo, Chihuahua, México. (Foto: L. Guerrero)

El sitio arqueológico de Paquimé, que se encuentra en la lista de Patrimonio Mundial, evidencia el clímax en el desarrollo de esta técnica constructiva. Destacan las dimensiones de los muros y las probables alturas que alcanzaron los edificios, algunos de los cuales llegaron a tener cinco niveles, según lo describen los cronistas españoles del siglo XVII y XVIII que encontraron este sitio después de más de trescientos años de haber sido abandonado por sus constructores nativos.

Cabe mencionar que en algunas publicaciones se ha difundido erróneamente que Paquimé se construyó con la técnica de tapia (González, 1995, p.54). Sin embargo, investigaciones recientes han puesto en evidencia que esta creencia es inexacta (Guerrero, 2011, p.7). La irregularidad geométrica de los edificios y los patrones de deterioro que presentan las estructuras, hacen suponer que el sistema predominante fue desarrollado mediante tierra moldeada en húmedo y mezclada que materiales rocosos (Gamboa, 2001, p.48).

En el año de 1985, un grupo de jóvenes arquitectos fueron contratados por una institución pública llamada *Consejo Nacional de Recursos para la Atención de la Juventud* (CREA), para proponer un sistema alternativo de construcción con tierra que permitiera la edificación de viviendas para grupos sociales de escasos recursos en todo México. Dicha asociación que se autodenominaba “Grupo CIMBRADOBE” estuvo representada por el arquitecto Jorge Alberto Sánchez Angulo y lo conformaban Angélica García, Laura Baungarte, Carlos Sánchez, Irma Mendoza, Consuelo Munguía, Carlos González, Francisco Tene, José Pinedo, Guillermo Madrigal, Miguel Elizondo, Alejandro Mejía y Miguel Mendoza.

Este colectivo se propuso desarrollar una técnica que permitiera sistematizar el manejo de tierra en estado plástico, proveniente de la tradición prehispánica antes descrita, pero apoyando el proceso constructivo mediante el uso de cimbras, con la lógica constructiva del concreto convencional. La técnica a la que denominaron “hormigón de barro”, empleaba como materia prima tierra estabilizada con cal, cemento, grava o paja. En aquel momento se proyectaron y construyeron varias casas piloto con dicha técnica y se diseñó una serie de manuales dirigidos hacia la autoconstrucción, enfocados hacia diferentes regiones climáticas del país. Desafortunadamente, como consecuencia de diversos cambios institucionales, el proyecto no tuvo continuidad y los cuadernillos nunca fueron publicados por lo que todo aquel esfuerzo se vio truncado.

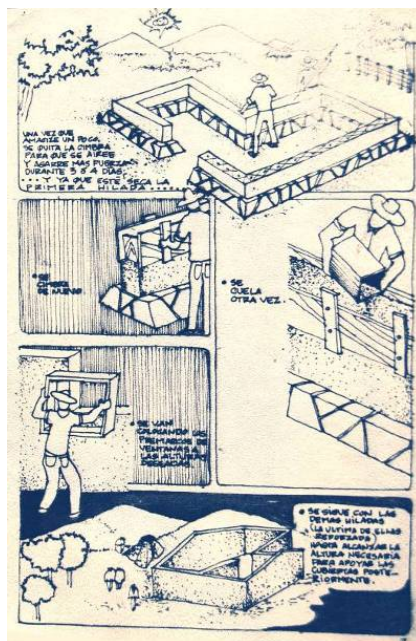


Figura 2. Página del *dummy* de los Manuales de Autoconstrucción diseñados en 1985 por el Grupo CIMBRADOBE.

Con estos antecedentes, en mayo del 2009 se planteó ante el *Programa de Mejoramiento del Profesorado* (PROMEP) dependiente de la Secretaría de Educación Pública de México, un proyecto de investigación vinculado con la conformación de Redes Temáticas de Investigación, con la participación de tres instituciones académicas: la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, la Universidad Autónoma de Tamaulipas en Tampico y la Universidad Autónoma de Nuevo León.

El nombre que se le dio al proyecto de investigación fue “Desarrollo de materiales y técnicas de construcción de bajo impacto ambiental para el diseño arquitectónico y la conservación del patrimonio edificado” y tuvo como una de sus líneas troncales la edificación con tierra.

Para tal fin se solicitaron recursos económicos para construir un edificio de “Usos Múltiples” en el que se pudieran poner en práctica tres sistemas constructivos: Bloques de tierra comprimida (BTC), tapia y hormigón de tierra estabilizada “HTE” (Doat et al., 1990, p.103). Se determinó diseñar un inmueble multifuncional, con requerimientos de espacios amplios, flexibles, bien iluminados, de estructura sencilla y con capacidad para edificarse en varias etapas, en función de los recursos económicos disponibles. (Soria; Guerrero; Roux, 2011, p.229).

Se presentó la propuesta arquitectónica a la Rectoría de la Unidad Xochimilco de la UAM y fue bien acogida, ofreciéndose para su edificación un extenso terreno que posee esta institución en la zona conocida como Las Ánimas, en Tulyehualco, al sur de la Ciudad de México. Sin embargo, las autoridades universitarias pusieron como condición que, además de albergar el citado edificio experimental, se desarrollara un anteproyecto de conjunto para todo el terreno, en el que se incorporaran áreas destinadas a actividades académicas de las tres Divisiones de la Universidad: Ciencias Sociales y Humanidades (CSH), Ciencias Biológicas y de la Salud (CBS), así como Ciencias y Artes para el Diseño (CyAD).

El área de esta última División incluiría el edificio experimental de tierra pero sería parte de un centro dedicado a la docencia, investigación y difusión de temáticas que relacionaran a la sustentabilidad ambiental con el diseño gráfico, industrial, arquitectónico y urbano, en correspondencia con las carreras que se imparten en Xochimilco. Como se trataba de propuestas de largo plazo, debido a los recursos económicos que implican, se decidió iniciar la construcción del módulo experimental utilizando fondos concurrentes de la Rectoría con los provenientes del proyecto PROMEP-SEP que se mencionó líneas arriba.

2. EL PROCESO CONSTRUCTIVO

La Sala de Usos Múltiples del *Centro de Investigación y Desarrollo Sustentable*, posee formas geométricas regulares y ocupa una superficie de 40 metros cuadrados.

La tierra que se empleó en la edificación, se conoce en México como “tepetate” y se mandó analizar al laboratorio *Geotecnia y Suelos* para conocer su granulometría. Los resultados mostraron que el 100% de la fracción gruesa de la tierra pasó por la malla No.4 y 37% de sus partículas finas pasaron por el tamiz No. 200. Posteriormente se determinaron los Límites de Atterberg de la fracción fina lo que arrojó un Índice de Plasticidad de 13.3 el cual, por ser superior al referente de 7, permitió llegar a la conclusión de que las tierras corresponden al grupo “SC”, es decir, “Arenas arcillosas”, dentro del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (Juárez; Rico, 2010, p.160).

Con la finalidad de evaluar la compatibilidad de los sistemas constructivos se decidió realizar los tramos cortos de los muros con bloques de tierra comprimida, los muros largos con hormigón de tierra estabilizada y tres pilastras que enmarcan el acceso principal con tapia. El techo también se hizo con hormigón de tierra, en la misma dosificación que los muros.

Como se observa en la figura 3, la volumetría del techo fue muy singular pues, además de experimentar con el sistema constructivo, se incorporó una propuesta formal basada en la conformación de cuatro superficies regladas, derivadas de la rotación de sus generatrices.

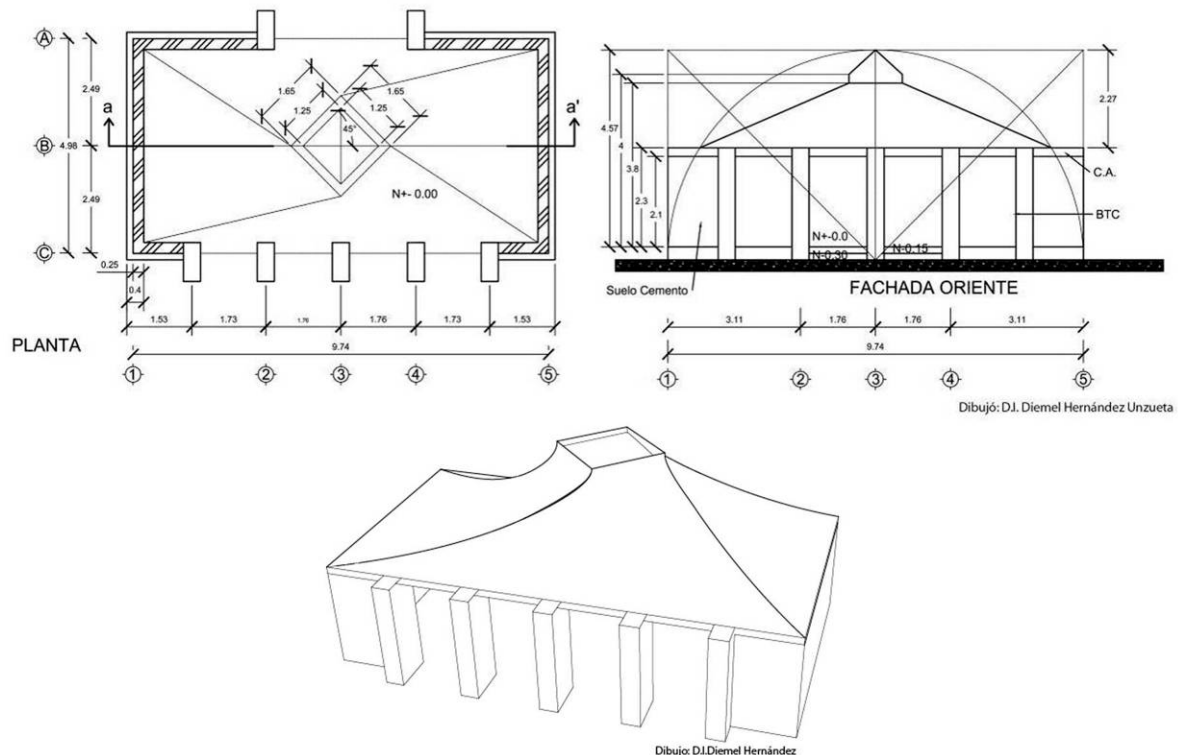


Figura 3. Plantas y volumetría del edificio

Como se trataba de una actividad académica que buscaba vincular la investigación con la docencia, desde la concepción del edificio hasta su materialización se contó con la participación de alumnos del último trimestre de la carrera de arquitectura, guiados por los profesores de construcción. Los alumnos incluso realizaron varias decenas de BTC y auxiliaron en la supervisión de la obra, la cual fue ejecutada por albañiles profesionales.

El prototipo consta únicamente de un local, que tiene forma rectangular, con una proporción de dos a uno, con un desarrollo longitudinal orientado de norte-sur. Los muros de los lados cortos del rectángulo no tienen vanos. Esto permite evitar la incidencia de los vientos dominantes del invierno que provienen del norte, así como limitar la penetración de los rayos solares por el sur, que en verano puede provocar el sobrecalentamiento del espacio.

La fachada principal que mira hacia el oriente presenta un amplio acceso cuyo vano se subdivide mediante tres pilastras realizadas con tapia que, posteriormente contarán con puertas parcialmente acristaladas para permitir la iluminación natural del espacio. En el otro lado largo del rectángulo, que conforma la fachada poniente, el vano mide la mitad que la puerta oriente. Igualmente tiene pilastras que lo enmarcan y, como en el lado opuesto, ayudan a rigidizar considerablemente la estructura. Se tiene previsto que esta puerta sea la conexión con dos módulos de idéntica geometría, que se edificarán posteriormente y que finalmente conformarán un amplio edificio de Usos Múltiples de 120 metros cuadrados.

La cimentación del conjunto se desplantó a una profundidad de 120 cm debido a que el subsuelo natural había sido perturbado y presentaba zonas con rellenos mal compactados. Se utilizó una zapata corrida realizada con basalto asentado con un mortero de cal y arena en proporción 1 a 5, que se coronó con una dala de concreto armado de 40 cm x 30 cm. Los tramos cortos de los muros se ejecutaron con BTC estabilizados con 10% de cal, con dimensiones de 10 cm x 15 cm x 30 cm y asentados con un mortero de igual dosificación. Estos bloques se produjeron con una prensa neumática de fabricación no industrializada. Las pilastras del acceso principal se construyeron con tapias estabilizadas con 10% de cemento, compactadas con pisones manuales.

Los muros experimentales de hormigón de tierra se realizaron con la misma "Arena Arcillosa SC" a la cual se le añadió, 5% de cal y 10% de cemento que fue la estabilización que mejores resultados había dado en pruebas realizadas en el Laboratorio de Materiales de la UAM-Xochimilco y cuya resistencia a la compresión se pudo medir en probetas de 10 cm de espesor alcanzando valores de 29,35 kgf/cm² a los 7 días y 45,85 kgf/cm² a los 14 días.

Además de estos estabilizantes, al hormigón de tierra se le agregó fibra de polipropileno virgen (Sika-fiber) en una proporción de 600 g por metro cúbico. Este componente facilitaba el proceso de mezclado y le confería mayor plasticidad a la mezcla a la hora de ser vertida.

Sobre la cimentación se armó el sistema de cimbras de madera que se utiliza de manera convencional en las obras semiartesanales que se realizan con concreto armado en México. Tanto el mezclado de la tierra como el vertido en la cimbra se hicieron de forma manual.



Figura 4. La primera hilada del muro de hormigón de tierra estabilizada (Foto: L. Guerrero)

El hormigón tenía aproximadamente un 20% de agua con la que adquiría una consistencia muy similar al barro que se utiliza para hacer adobes. Conforme se fue llenando la cimbra se hicieron incisiones a la mezcla para conseguir un llenado homogéneo y finalmente se apisonó ligeramente capa por capa, dado que el estado plástico de la mezcla no permite una compactación real. En el clima de la Ciudad de México durante el mes de agosto, con temperaturas que oscilan entre los 15°C y 25°C, con humedades relativas de 60-70%, las hiladas de 40 cm de espesor, 60 cm de altura y 6 m de longitud fraguaron a un ritmo que permitía descimbrar en 24 horas y colocar la siguiente hilada inmediatamente. Así, los muros pudieron ser concluidos totalmente en nueve días.

Sobre estos componentes y las pilastras de tapia que se habían realizado previamente, se

dispuso una trabe perimetral de concreto armado de 15 cm de peralte como elemento de cerramiento y soporte del techo. El diseño de la cubierta se consiguió a partir de una propuesta que ya había probado en varios inmuebles el arquitecto Mario Larrondo y que es el producto de la intersección en el eje vertical de una pirámide rectangular y un prisma rectangular cuadrado de menor dimensión, que al girarlo 45° sobre el eje longitudinal de ambos cuerpos desarrolla cuatro superficies regladas continuas.

La premisa para la concepción de este sistema de techo, además de permitir el uso del hormigón de tierra estabilizada, radica en la disminución al mínimo de los refuerzos de acero y la eliminación total del uso de cimbras.

Para el trazo y ejecución de la cubierta se requirió de la colocación de un andamio de la altura final de la pirámide truncada, sobre el cual se sujetó un marco de planta cuadrada de 1.65 m, realizado con cuatro varillas de acero corrugado #4 y estribos #2 a cada 10 cm, que constituyen el refuerzo del anillo de compresión de la parte alta de la cubierta.

El techo es cargado por la dala perimetral que confina los muros, desde cuyos vértices se tiende la estructura de acero de las cuatro vigas que forman las aristas de la pirámide truncada. Estas vigas que funcionan como las nervaduras de una bóveda, están compuestas cada una de 3 varillas #4 y estribos #2 a cada 10 cm. Estos refuerzos que en un primer momento funcionaron como guías para el trazo de las superficies regladas y posteriormente como cimbra, al final del proceso constructivo quedaron ahogados por el hormigón de tierra estabilizada, de manera que la cubierta de forma piramidal semi girada, se comporta como una sola pieza. La curvatura de sus generatrices la hacen *resistente por forma* y permiten reducir al mínimo los refuerzos de acero.



Figura 5. La primera capa de hormigón de tierra sobre la malla metálica del techo (Foto: L. Guerrero)

Finalmente, las superficies alabeadas se estructuraron por varillas de acero corrugado #2, las cuales soportan superficies de metal desplegado, del que se utiliza convencionalmente para la colocación de falsos plafones en cielos rasos. Se trata de un material constructivo muy económico y resistente que, debido a las pequeñas dimensiones de sus huecos, sirve como cimbra durante el vertido de la mezcla. Los rollos de dicha malla se tendieron sobre la retícula de varillas de acero, a la que se ataron con alambre recocido.

Una vez armado este ligero refuerzo metálico se vertió el hormigón de tierra estabilizada, el cual fue extendido sobre la malla con una cuchara de albañil, como si se tratara de un revoco de aproximadamente tres centímetros de espesor. Una vez que se cubrió todo el techo y empezó a fraguar, se humedeció y se colocaron dos capas consecutivas. Sobre los muros, el espesor final de la cubierta es de 15cm pero éste disminuye hasta 9 cm en la parte más alta, en el área en la que se une con el anillo de compresión, el cual es relleno con la misma mezcla de hormigón de tierra estabilizada para trabajar de forma monolítica. El acabado final fue de ladrillo de barro cocido, impermeabilizado con jabón y alumbre.

3. RESULTADOS

El diseño y construcción de un prototipo en el que se introdujo el sistema de hormigón de tierra estabilizada en muros y cubiertas, ha permitido evaluar diversos aspectos de su materialización. Esta técnica presenta diversas bondades desde el punto de vista material, estructural y logístico, en comparación con el resto de los sistemas de edificación con tierra.

El proceso resultó ser muy económico como consecuencia del ahorro en el cemento y el acero, materiales que además de tener un alto impacto sobre el medio ambiente, están entre los insumos más caros en la construcción convencional. Se trata de una técnica muy versátil para el desarrollo de cualquier tipo de forma constructiva. Su sistema de elaboración requiere de pocos conocimientos especializados y puede resultar muy viable para la implementación de procesos de autoconstrucción asistida.

Por otra parte, tiene la ventaja de que su elaboración es muy familiar para los albañiles, acostumbrados a la construcción convencional de concreto armado. Además, a diferencia de la construcción de tapias, el esfuerzo físico que demanda la elaboración y vertido del hormigón de tierra es mínimo. Sólo se requiere de una adecuada organización del trabajo.

Se pudo observar que entre los puntos clave para la buena calidad de la obra destacan la trituración de la tierra, la humidificación gradual del hormigón durante su preparación y sobre todo, el tiempo y calidad del mezclado. Desafortunadamente no se pudo contar con una mezcladora mecánica por lo que el proceso se ejecutó con palas, lo que incidió en su rendimiento y en la falta de homogeneidad de algunas partes de la estructura.

Empero, la principal cualidad del sistema está en su velocidad. La elaboración de muros y techo tardó catorce días, a pesar de que hubo diversos retrasos derivados de tardanza en la entrega de materiales y de las lluvias que obligaban a realizar algunas jornadas más cortas.



Figura 6. El enladrillado protege la cubierta de la intemperie y le da estabilidad. (Foto: L. Guerrero)

Es evidente que el hormigón de tierra estabilizada representa un sistema alternativo sumamente viable para la ejecución de obras masivas de tierra en las que buena parte de los procesos puedan ser mecanizados. Además, se abre la posibilidad de reducir considerablemente los espesores de los muros a partir de su refuerzo interno, de manera similar a la que se utilizó en el prototipo para el sistema de cubiertas. Así, se podría contar con una estructura sísmo resistente con muros tan delgados como los sistemas constructivos convencionales de ladrillo o bloques huecos de cemento o cerámica.

En el prototipo los muros miden 40 cm de espesor como consecuencia de las luces requeridas por el esquema de planta libre. Sin embargo, es evidente que, por ejemplo, para el diseño de una vivienda mínima, las subdivisiones de los espacios por muros de carga, disminuirían radicalmente los espesores de los muros, haciendo del hormigón de tierra estabilizada un sistema constructivo competitivo con el resto de las técnicas comerciales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cruz, S. (2007). Estructuras arqueológicas del tipo casas en acantilado en el estado de Chihuahua. En Guerrero, L. (Coord.) *Patrimonio Construido con Tierra*. México D.F.: UAM-Xochimilco, pp. 31-46.
- Doat, P. et al (1990). *Construir con tierra*. Tomo I. Bogotá: CRAterre-Fondo Rotatorio Editorial.
- Gamboa, E., (2001). Paquimé y el mundo de la cultura de Casas Grandes. *Arqueología Mexicana*, Vol. IX, No.51. México D.F.: CONCA-Raíces, pp. 46-51.
- Gamboa, E.; L. Guerrero (2013). Condicionantes par la puesta en valor e las casas en acantilado de la sierra de Chihuahua, México en *digitAR - Revista Digital de Arqueología, Arquitectura e Artes* No.1, Enero. Coimbra: Centro de Estudos Arqueológicos das Universidades de Coimbra e Porto, pp. 5-13.
- González, J. (1995). Paquimé Casas Grandes. En Pereira, H. *HABITERRA*. Bogotá: ESCALA
- Guerrero, L. F. (2002). El tapial, una técnica constructiva ecológica. *Anuario de Arquitectura Bioclimática 2002*. México D.F.: LIMUSA-UAM-Azcapotzalco, pp. 147-158.
- Guerrero, L. (2007). Arquitectura de tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva. *Revista Apuntes*. Vol. 20. No. 2. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, pp. 182-201.
- Guerrero, L. (2011). Pasado y porvenir de la arquitectura de tapia, en *Revista Bitácora Arquitectura*. Vol. 1. No. 22. México D.F.: UNAM, p.p. 6-13.
- Juárez, E.; Rico, A. (2010). *Mecánica de Suelos*, Tomo1, México D.F.: LIMUSA
- Soria, F. J.; L. Guerrero; R. Roux (2011) Investigación interuniversitaria sobre construcción alternativa con tierra en México, en *Construcción con tierra, tecnología y arquitectura*, Valladolid: Universidad de Valladolid, pp. 229-240.

Currículos

Luis Guerrero. Arquitecto, Maestro en Restauración Arquitectónica y Doctor en Diseño con especialidad en Conservación Patrimonial. Profesor-Investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco. Miembro de la Red Iberoamericana PROTERRA. Coordinador del Comité Científico de Patrimonio Construido con Tierra del ICOMOS Mexicano.

Francisco Javier Soria López. Arquitecto, Maestro en Restauración Arquitectónica y Doctor en Proyectos Arquitectónicos. Profesor-investigador del Departamento de Tecnología y Producción de la UAM-Xochimilco y Coordinador del Cuerpo Académico en Conservación y Reutilización del Patrimonio Edificado. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores.

Mario Larrondo Shiels. Arquitecto, Profesor-investigador y Jefe del Departamento de Síntesis Creativa de la División de Ciencias y Artes para el Diseño de la UAM-Xochimilco.