



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

**LAS TAPIAS DE LA REGIÓN DE TEPEYAHUALCO, PUEBLA, COMO ALTERNATIVA PARA  
EL RESCATE Y ACTUALIZACIÓN DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES**

Tesis que para obtener el grado de Doctora en Arquitectura presenta:

María de los Ángeles Vizcarra de los Reyes



MÉXICO, MMXIX



INSTITUTO  
DE INVESTIGACIONES  
HISTÓRICAS



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA  
FACULTAD DE ARQUITECTURA  
FES ARAGÓN  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES HISTÓRICAS

**LAS TAPIAS DE LA REGIÓN DE TEPEYAHUALCO, PUEBLA, COMO ALTERNATIVA PARA EL RESCATE  
Y ACTUALIZACIÓN DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES**

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE DOCTORA EN ARQUITECTURA

PRESENTA:  
**MARÍA DE LOS ÁNGELES VIZCARRA DE LOS REYES**

TUTOR  
DR. LUIS FERNANDO GUERRERO BACA, UAM-Xochimilco

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR  
DR. ALBERTO GONZÁLEZ POZO, UAM-Xochimilco  
DR. JOSÉ DIEGO MORALES RAMÍREZ, Facultad de Arquitectura, UNAM

SINODALES  
DRA. MARÍA DE LOURDES DÍAZ HERNÁNDEZ, Facultad de Arquitectura, UNAM  
DR. JUAN GERARDO OLIVA SALINAS, Facultad de Arquitectura, UNAM  
Ciudad Universitaria, CDMX, septiembre de 2019

## COMITÉ TUTOR

Tutor principal

Dr. Luis Fernando Guerrero Baca  
División de Ciencias y Artes para el Diseño, UAM-Xochimilco

Cotutores

Dr. Alberto González Pozo  
División de Ciencias y Artes para el Diseño, UAM-Xochimilco

Dr. José Diego Morales Ramírez  
CIAUP, Facultad de Arquitectura, UNAM

## SÍNODO

(en orden alfabético)

Dra. María de Lourdes Díaz Hernández  
Dr. Alberto González Pozo  
Dr. Luis Fernando Guerrero Baca  
Dr. José Diego Morales Ramírez  
Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas

“Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, considerado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí contenidas, manifiesto que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Las citas de otras obras y las referencias generales a otros autores, se consignan con el crédito correspondiente”.



## **AGRADECIMIENTOS**

Merecen un especial reconocimiento todos los maestros constructores tradicionales de la región de Tepeyahualco, por haber compartido parte de su sabiduría y por su amabilidad y paciencia para transmitirme el conocimiento ancestral que poseen: al maestro Gildardo Torres, constructor de tapias de tierra de la comunidad de San Andrés Payuca en Puebla, por la entrevista y por compartir sus conocimientos; agradezco también al maestro Guadalupe Reyes, de la comunidad de Tepeyahualco, quien nos transmitió de viva voz su conocimientos, además de haber construido una tapia para que pudiéramos videograbar el procedimiento constructivo con todo detalle. Mi agradecimiento especial al maestro Agustín Cervantes, cronista de Tepeyahualco, quien nos concedió la primera entrevista sobre este tema, nos dio todas las facilidades para la documentación y además nos facilitó los materiales para realizar las pruebas del laboratorio.

Mi más profundo agradecimiento a todos y cada uno de los estudiantes que han colaborado en el Laboratorio de procedimientos y sistemas constructivos tradicionales como alternativa para una arquitectura sustentable (LABPySCT), y a mis colegas con quienes he trabajado los últimos cinco años en este proyecto: Francisco Hernández, Aurelio Sánchez y Luis Fernando Guerrero, quien además me ha guiado con mucha paciencia durante el desarrollo de esta investigación como mi director de tesis, y nos ha asesorado a lo largo de la conformación del Laboratorio.

Mi agradecimiento para los asesores y lectores del documento, que conforman el sínodo de esta tesis, por sus comentarios y la guía para llevar a buen término esta investigación, y a mi madre por su paciente lectura y asesoría.

Finalmente, es importante mencionar el apoyo del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica de la UNAM (PAPIIT), así como el apoyo del Director de la Facultad de Arquitectura, Mtro. Marcos Mazari Hiriart, para el surgimiento y consolidación del LABPySCT, sin este espacio esta tesis no hubiese podido consolidarse.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	9
<b>CAPÍTULO 1.</b>	
<b>SOSTENIBILIDAD Y ARQUITECTURA TRADICIONAL</b> .....	13
¿Qué es la sostenibilidad? El estado de la cuestión	
Arquitectura vernácula y sostenibilidad	
Pensamiento sistémico	
Memoria biocultural	
Sabiduría corporal	
Las sabidurías tradicionales como salvaguarda de la memoria	
<b>CAPÍTULO 2.</b>	
<b>LOS SABERES CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES DE LA REGIÓN DE TEPEYAHUALCO</b> .....	29
Antecedentes históricos de la región	
Contexto geográfico	
Sistemas constructivos de la región	
• Piedra apilada	
• Piedra y cal	
• Tapias de tierra	
• Techumbres y entrepisos	

### **CAPÍTULO 3.**

#### **LAS TAPIAS DE POMA DE TEPEYAHUALCO Y EL FUERTE DE LA UNIÓN..... 55**

- Surgimiento del sistema constructivo
- Tipología arquitectónica
- Caracterización de los materiales y ubicación de los bancos de obtención
- Procedimiento constructivo
- Variantes de la mezcla de materiales

### **CAPÍTULO 4.**

#### **LA TIERRA, LA CAL Y LOS MATERIALES VOLCÁNICOS COMO ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS SOSTENIBLES..... 75**

- La tierra
- La cal
- Estabilización de suelos
- Los materiales volcánicos como puzolanas
- Reacciones puzolánicas

### **CAPÍTULO 5.**

#### **PROCESO EXPERIMENTAL..... 95**

- Metodología
- Elección de materiales
- Equipos e instrumental

Resultados y discusión  
Aportaciones  
Futuras investigaciones

**CONCLUSIONES** ..... 127

**BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS** ..... 135

## INTRODUCCIÓN

El tema central de este trabajo es el estudio de las tapias y sus procedimientos constructivos, y en particular, las tapias encontradas en el municipio de Tepeyahualco, en el estado de Puebla en México, hechas con residuos de cal, tierra y rocas volcánicas.

El interés en el estudio de este tema surge del proyecto de investigación del *Laboratorio de procedimientos y sistemas constructivos tradicionales como alternativa para una arquitectura sustentable*<sup>1</sup> (LABPySCT), desarrollado en el Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje (CIAUP) de la Facultad de Arquitectura de esta Universidad desde 2014. En este proyecto se propone hacer un estudio integral de los elementos que conforman las tradiciones constructivas en México, que permita entender lo que implica cada sistema constructivo, no sólo desde la dimensión física como se hace regularmente sino también desde los contextos donde se practica, permitiendo dar más herramientas para el entendimiento de las motivaciones por las cuales estos saberes constructivos son considerados parte de un patrimonio tangible e intangible de la humanidad.

Reflexiona sobre cómo conocer, rescatar, estudiar y experimentar estas tradiciones constructivas puede contribuir a generar conocimiento en el campo de la sos-

tenibilidad en la arquitectura en términos económicos, técnicos, sociales, culturales y ambientales (Vizcarra, 2017). En una primera fase, se han documentado diez sistemas constructivos de cuatro regiones del país, entre ellos un sistema para la fabricación de muros con base en una tapia hecha con rocas volcánicas, entre ellas la piedra pómez (llamada piedra poma en la región), tierra y residuos de cal, encontrado en la región de Tepeyahualco, al nororiente del estado de Puebla.

La razón para profundizar en el estudio de las tapias de Tepeyahualco en particular, surge de la peculiaridad de este sistema constructivo tradicional en cuanto al uso y combinación de materiales, la adaptación de la técnica a nuevas exigencias, y al ingenio en la innovación desarrollado en esta técnica a partir de procedimientos constructivos tradicionales presentes en la región. A la fecha no se tiene registro de un sistema constructivo similar en nuestro país.

Otro factor para su estudio es que de los diez sistemas documentados en el LABPySCT, éste presenta signos de haber surgido a partir de otras técnicas constructivas locales. Si bien es un sistema constructivo relativamente reciente según los datos encontrados en trabajo de campo, se infiere que ha sido conformado a partir del aprendizaje y la fusión de dos técnicas constructivas de mayor antigüedad presentes también en la región nororiente de

---

1. Para mayor detalle sobre el proyecto de investigación del LABPySCT consultar Vizcarra (2017), y la página web del Laboratorio: <https://arquitectura.unam.mx/procedimientos-y-sistemas-constructivos.html>

Puebla: los terrados hechos con piedra pómez y cal empleados en las techumbres, y la tapia de tierra cruda, generando así un ingenioso sistema para la fabricación de muros de carga. De las cubiertas toma la combinación de materiales y de las tapias de tierra, los encofrados para la construcción del muro.

## **Planteamiento del problema de investigación**

Con frecuencia se sostiene que una de las cualidades de la arquitectura tradicional es su adaptabilidad a los cambios socioculturales, climáticos económicos e históricos, sin embargo, con base en las observaciones hechas en campo en las investigaciones producto del LABPySCT a partir de la documentación de diez sistemas constructivos tradicionales localizados en cuatro regiones de México, ha podido constatarse que las obras vernáculas, en la mayoría de los casos, en lugar de adaptarse están desapareciendo. Así, a partir de detectar signos de evolución dentro de su propio contexto cultural en el sistema constructivo de tapia de piedra pómez encontrado en Tepeyahualco, Puebla, como la optimización de procedimientos y materiales constructivos a partir de las técnicas tradicionales y los materiales de la región, surgen los siguientes cuestionamientos:

¿Qué factores incidieron en que este sistema haya surgido? ¿De qué manera, ante la homogeneización de la cultura a escala mundial y la globalización socioeconómica, los sistemas constructivos tradicionales aún vivos en algunas poblaciones rurales de nuestro país, pueden transformarse desde su propio contexto cultural? ¿Qué lecciones se pueden aprender de las tradiciones cons-

tructivas para ser aplicadas en los temas de la sostenibilidad de la arquitectura?

## **Hipótesis**

Si el tapial de piedra pómez y residuos de cal encontrado en la localidad de Tepeyahualco al norte del Estado de Puebla ha surgido de otros sistemas constructivos dentro de la misma región, y si se confirman los factores a partir de los cuales se infiere esta transformación, como el uso de materiales disponibles en la localidad; su derivación de otros sistemas constructivos del propio contexto cultural (del tapial de tierra cruda y de los terrados de cal y piedra pómez); la transmisión de saberes y habilidades de sobrevivencia de generación en generación, en este caso para satisfacer la necesidad de vivienda; su adaptabilidad a las condiciones económicas y a la transformación en los modos de vida; y finalmente, su durabilidad y poco mantenimiento; entonces es factible, a partir de esta información, generar parámetros de identificación de variables evolutivas que puedan aplicarse en otras tradiciones constructivas del país, para evitar su desaparición y detonar procesos para su preservación en primer lugar, y para propiciar su actualización en segundo, en términos de sus propios contextos socioeconómicos y culturales.

Se busca también, a partir del estudio de este fenómeno, generar parámetros de sostenibilidad arquitectónica y una metodología para su medición en términos fundamentalmente cualitativos. En este orden de ideas, se propone como objetivo general determinar, desde una perspectiva sistémica, los factores que han permitido la

transformación y vigencia del sistema constructivo tradicional de tapia de piedra pómez, tierra y residuos de cal; que sean aplicables a otras tradiciones constructivas en riesgo de desaparecer, y contribuyan a la generación de parámetros para su propia transformación.

En cuanto a los objetivos particulares, se proponen los siguientes:

- Estudiar las condiciones históricas, socioculturales, económicas y ambientales de la región donde se desarrolló este sistema constructivo
- Caracterizar desde la perspectivas técnica, social, económica, histórico-cultural y ambiental la tapia de piedra pómez
- Identificar, con base en los hallazgos de los puntos anteriores, los sistemas constructivos de los que proviene esta tapia
- Definir bajo los enfoques técnico, social, económico, histórico-cultural y ambiental los sistemas constructivos de los que provienen los muros de tapia de piedra pómez
- Generar parámetros de identificación del proceso de transformación de la tapia en estudio que sean susceptibles de aplicarse en otras tradiciones constructivas que tengan características similares, y que ayuden a detonar sus propios procesos evolutivos
- Identificar posibles aportaciones a partir del estudio de este fenómeno en el campo de la sostenibilidad en términos técnicos, ambientales, económicos, sociales y culturales

## Estructura del documento

En primer lugar se construyó el marco de referencia mediante los principios básicos del pensamiento sistémico; las bases teóricas que sustentan la metodología del proyecto *VerSus (Vernacular knowledge for sustainable architecture)*, proyecto llevado a cabo por varias instituciones europeas que tiene como propósito obtener conocimientos de los principios fundamentales de la sostenibilidad presentes en el patrimonio vernáculo en Europa principalmente, y explorar nuevas formas de aplicar estos principios en la arquitectura contemporánea (Correia, Dipasquale y Mecca, 2014); y las disertaciones de Pallasmaa (2012) y Toledo y Barrera (2008) en torno al conocimiento corporal, ideas que quedan expuestas en el primer capítulo de este trabajo.

Una vez establecida la perspectiva desde la cual se aborda el fenómeno de estudio, en el segundo capítulo del documento se da cuenta de la investigación que se realizó en la región sobre los procesos históricos, la arquitectura local y sus procedimientos y sistemas constructivos, en especial los sistemas que preceden al fenómeno de estudio.

En el tercer capítulo se describe la investigación de campo llevada a cabo en el sitio de estudio, mediante entrevistas y conversaciones videograbadas con los maestros constructores de la localidad que conocen la técnica constructiva. Estas entrevistas fueron realizadas con formatos de entrevistas formulados a partir de métodos de investigación antropológica. Se documentó con precisión el procedimiento constructivo estudiado así como

los sistemas edilicios que le anteceden, con el fin de comprobar los factores planteados en la hipótesis. También se documentaron en campo, mediante fotografías y dibujos, los restos de estructuras históricas de tapia. En este mismo capítulo, se da cuenta de la identificación los bancos de materiales y las relaciones existentes entre los procesos de elaboración de dos sistemas constructivos asociados con las tapias en estudio. Por una parte están las cubiertas de terrado realizadas con piedra pómez y residuos de cal, y por otra la tradición de la tapia de tierra de posible origen colonial y evolución decimonónica.

En el cuarto capítulo del documento se explica el estado del arte en cuanto a la construcción con tierra y cal y en cuanto a las combinaciones entre ambas. Se aborda también la explicación de algunas reacciones químicas de la cal con la tierra y algunos compuestos minerales de origen volcánico que dan lugar a las reacciones puzolánicas, que ayudan a comprender el fenómeno constructivo de esta investigación.

En el quinto y último capítulo, con los datos recabados en campo se describe el estudio técnico y experimental del sistema, mediante pruebas en laboratorio para caracterizar y comprender la composición de las mezclas utilizadas en el sistema constructivo estudiado. También en esta fase se compara el sistema constructivo en cuestión con los sistemas de los que se deriva, en términos teóricos y experimentales, que permiten dilucidar algunos hallazgos y aportaciones susceptibles de ser aplicados a otras técnicas constructivas tradicionales con características similares.

Finalmente, se da cuenta de las conclusiones de la investigación, así como de algunos hallazgos no previstos que pueden abrir nuevas líneas de investigación en este campo.

**CAPÍTULO 1.**  
**SOSTENIBILIDAD Y**  
**ARQUITECTURA TRADICIONAL**



## 1. SOSTENIBILIDAD Y ARQUITECTURA TRADICIONAL

### ¿Qué es la sostenibilidad? el estado de la cuestión

El concepto de sostenibilidad fue introducido a principios de los años ochenta del siglo pasado por Lester Brown, fundador del *Worldwatch Institute*<sup>2</sup>, al definir una sociedad sustentable como aquella que fuera capaz de satisfacer sus necesidades sin comprometer las oportunidades de generaciones venideras. Varios años después, el informe de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo de la Organización de las Naciones Unidas titulado “nuestro futuro común” (*Our common future*, más conocido como *Informe Brundtland*<sup>3</sup>) utilizaba la misma definición para formular el concepto de desarrollo sostenible. Así, desde el punto de vista sociocultural, una sociedad sostenible es aquella que satisface sus necesidades sin que las expectativas de las generaciones futuras se vean mermadas.

Lo sostenible desde la perspectiva biológica, significa que una actividad desde todos los puntos de vista prácticos puede continuar indefinidamente (Boada y Toledo, 2003). Esto involucra procesos cíclicos tanto de

producción, como de funcionamiento y mantenimiento.

Desde un punto de vista rigurosamente ecológico, un ecosistema funciona de un modo sostenible si lo que recibe y lo que genera, tanto en energía como en materiales, está en equilibrio, si pasado el tiempo no se pierden cantidades sustanciales de nutrientes. Esta situación se puede describir como un equilibrio dinámico o “estado estable”, aunque en el sistema siempre haya fluctuaciones (Callenbach, 1999).

Ninguno de los actuales sistemas de producción para satisfacer las necesidades humanas básicas cumple los criterios necesarios para alcanzar un desarrollo sostenible. Con la ayuda de la energía cuya fuente principal es el petróleo, se extraen cantidades insostenibles de nutrientes del suelo del planeta para la agricultura, con el consecuente desequilibrio de la vida en la Tierra a través de la aplicación masiva de productos químicos, por hablar solamente de uno de muchos procesos de producción de la era moderna.

Estos procesos reciben el nombre de extractivos, ya que sustraen los recursos necesarios para que los ciclos naturales continúen llevándose a cabo, sin preocuparse por devolver o reinsertar los residuos de estas ac-

---

2. Organización no gubernamental fundada en 1974 con sede en Washington, DC, que investiga el impacto de las acciones del ser humano sobre el medio ambiente y sobre la vida con rigurosidad científica.

3. Documento publicado en 1987 bajo el título “Nuestro futuro común” más conocido como “Informe Brundtland”, elaborado por la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo, creada por las Naciones Unidas y presidida en ese momento por Gro Brundtland, la primera ministra de Noruega. El informe consolida una visión crítica del modelo de desarrollo adoptado por los países industrializados e imitado por las naciones en desarrollo, destacando la incompatibilidad entre los modelos de producción y consumo vigentes en los primeros y el uso racional de los recursos naturales y la capacidad de soporte de los ecosistemas

tividades en dichos procesos. Al hacerlo, los ciclos naturales quedan rotos, lo que provoca el agotamiento del sistema al no poder regenerarse, ya que acaban con las reservas biológicas explotadas, así como con los entornos que les dan sustento.

La característica más sobresaliente de la Tierra consiste en su capacidad para sustentar la vida. Lo que se preserva en una comunidad sostenible no es su crecimiento económico ni su desarrollo -idea que ha sido durante décadas el paradigma dominante impulsado desde los centros de poder y llevado a todos los rincones del mundo: crecimiento infinito en un mundo finito- sino toda la trama de la vida, de la que depende la supervivencia de la humanidad a largo plazo. Una comunidad respetuosa con esa trama está diseñada de modo que sus formas de vida, de negocios, de economía, de estructuras físicas y de tecnologías no perturben la capacidad intrínseca de la naturaleza para sostener la vida; por el contrario, deben cooperar para promoverla (Capra y Luisi, 2014).

Para ello, es urgente superar la alienación de la naturaleza producto de tres siglos de la visión fragmentaria cartesiana proveniente de la Ilustración, y entender que los seres humanos somos parte de la naturaleza, y que nuestra vida depende de ella. Es necesario abandonar el paradigma que concibe a la naturaleza como un ente independiente, infinito, al que es posible dominar. Las formas de vida de las comunidades sostenibles evolucionan con el tiempo en continua interacción con otros sistemas vivos, tanto humanos como no humanos.

Por otro lado, es urgente reparar en el uso de los términos “sostenibilidad”, o “desarrollo sostenible”; pues ahora son utilizados como fórmulas casi mágicas para superar la crítica situación del planeta; tal como afirman Toledo y Ortiz (2014:12), y han sido tan manidos “que su proliferación y sobreuso los han convertido en conceptos polisémicos, abstractos, inviables, incongruentes, cosméticos, superficiales y hasta perversos... **del mito del desarrollo se ha pasado al mito de la sustentabilidad**”.

La raíz de esta crisis no es tecnológica, sostengo que es un problema ético. Tal como argumentan los autores mencionados, las sociedades sostenibles deberán estar regidas por una ética planetaria, por un trabajo solidario con la sociedad y con la naturaleza, y por una re-inención de la acción, la participación y la política. Al parecer, los únicos capaces de aterrizar estas ideas, han sido algunas sociedades civiles, donde se extienden experiencias efectivas de sostenibilidad, algunas de ellas basadas en culturas y conocimientos tradicionales locales.

### **Arquitectura vernácula y sostenibilidad**

En este contexto, los ámbitos construidos y sus arquitecturas se sitúan en el centro de las preocupaciones medioambientales y ecológicas. El interés por la evolución de los grandes asentamientos ha aumentado de manera extraordinaria, pues su futuro es ineludiblemente el mismo de la sociedad y de la humanidad; ya que las ciudades del planeta, construidas solamente en el 2% de la superficie terrestre, consumen alrededor del 75% de

los recursos del mundo (Girardet, 2007). Esta crisis ambiental se refleja en la arquitectura mediante la poca o nula relación de la edificación contemporánea con el medio natural y sus limitados recursos, y en la casi inexistente conciencia respecto al impacto ambiental de la industria de la construcción; desde la producción de materiales hasta los residuos que ésta genera.

Por otra parte, alrededor del mundo y especialmente en países como México, calificados como “en vías de desarrollo”<sup>4</sup>, diversos factores han puesto en peligro una rica cultura tradicional de vida en comunidad, con todas sus expresiones culturales, técnicas y artísticas; entre ellos una cuestionable imagen de progreso vinculada al urbanismo y la arquitectura contemporáneos, las políticas gubernamentales en general hostiles a las culturas tradicionales, la especulación inmobiliaria, entre otros.

Bajo este escenario, y para contribuir a la búsqueda de respuestas a esta problemática desde el ámbito de estudio de la arquitectura, se ha vuelto la mirada a la arquitectura vernácula y sus tradiciones constructivas. De acuerdo con la definición etimológica y el diccionario histórico de la lengua francesa (Guillaud, 2014:33), la noción de arquitectura vernácula se basa en el término *verna*, que en latín quiere decir “esclavo nacido en la casa” (Corominas, 2008), y por lo tanto *vernáculo* quiere

decir “doméstico, nativo, de nuestra casa o país” (DRAE, 2012). De acuerdo con Guillaud, quien a su vez cita a Pierre Frey (2010), la “condición vernácula” significa “todo lo que era manufacturado, tejido, o criado en casa y no hecho para vender, sino para uso doméstico”. Por lo tanto, lo que es vernáculo no tiene valor de mercado. Por extensión, la definición incluye la arquitectura de un territorio y/o un grupo humano, o de un grupo etnográfico, que vive ahí. La arquitectura vernácula usa comúnmente materiales locales, y es una arquitectura contextualizada, que pertenece a una región o área particular, y que fue construida para un propósito doméstico, en el sentido descrito anteriormente.

Siguiendo a Guillaud (2014), el término “arquitectura vernácula”, usado en la actualidad, se deriva del inglés y surge como una referencia al trabajo de figuras prominentes como Bernard Rudofsky (1964) y Paul Oliver (1997), pioneros en las definiciones y estudios sobre arquitecturas vernáculas y tradicionales a nivel mundial, cuyas investigaciones comienzan en los años sesenta del siglo pasado. Este término normalmente se refiere a la arquitectura tradicional o popular, en oposición a la arquitectura escolarizada o académica. Desde un punto de vista teórico, Paul Oliver se refiere a Rudofsky en su definición de arquitectura vernácula y retiene la noción de arquitectura popular, arquitectura sin arquitec-

---

4. Esta clasificación, hecha desde una visión eurocentrista, producto de las ideas surgidas a partir de la revolución industrial, clasifica a los países del mundo, desde un punto de vista exclusivamente económico, como desarrollados, en vías de desarrollo y subdesarrollados. Se entrecomilla esta frase porque en este trabajo no se está de acuerdo con esta clasificación, ya que subestima las culturas tradicionales considerándolas como atrasadas y busca su desaparición mediante la “superación” de estos estados, que conduzcan a la modernización propuesta por los ingleses desde la revolución industrial (ver apartado Memoria biocultural en este mismo capítulo).

tos, expresión de una “ciencia indígena de la construcción”. Esta idea contrasta con la arquitectura “aprendida”, que es producida por los “Administradores del arte de construir”, es decir, individuos, gremios e instituciones que rompen con el vínculo y las condiciones que exige el lugar. Por último, Guillaud (2014) menciona la importancia de los parámetros culturales y antropológicos que Rapoport (1972) introdujo en su definición de arquitectura vernácula.

A nivel internacional, se observa un sólido discurso en torno a la arquitectura vernácula y tradicional respecto a su relación con la sostenibilidad. De acuerdo con Vellinga (2015), coautor junto con Paul Oliver del atlas de arquitectura vernácula del mundo, el interés específico por esta relación surgió a principios de 1980, cuando un reducido número de estudios que se enfocaban en el desempeño ambiental de la arquitectura vernácula fueron presentados en el primer congreso de PLEA (Passive and Low Energy Architecture) en Bermudas en 1982. Enseguida, Hassan Fathy publicó *Energía Natural y Arquitectura Vernácula* (1986). A pesar de este descubrimiento temprano, el interés en los círculos académicos en la sostenibilidad de la arquitectura vernácula permaneció al margen hasta 1990, cuando la sostenibilidad en general emergió como un tema de interés político, académico y popular. Hasta entonces, todo el trabajo de investigación se centró en la relación de la arquitectura tradicional y el entorno natural en términos muy generales. Esta situación cambió significativamente poco después de la publicación de la Enciclopedia de la arquitectura vernácula en el mundo (*Encyclopedia of Vernacular Architecture of the World*) de Paul Oliver, en 1997. A partir del año 2000, se

observa un incremento significativo en la discusión sobre la relación de la sostenibilidad y la arquitectura vernácula, reflejada en la publicación cada vez más constante de artículos, ponencias y libros sobre el tema. Una síntesis de toda esta discusión se centra en el proyecto VerSus (*Vernacular knowledge for sustainable architecture*), que tiene como propósito obtener conocimientos de los principios fundamentales de la sostenibilidad presentes en el patrimonio vernáculo, y explorar nuevas formas de aplicar estos principios en la arquitectura contemporánea (Correia et al. 2014). En este proyecto se resume la discusión académica sobre este tema que mantienen diversas instituciones de la Unión Europea, como la Escuela Superior Gallaecia de Portugal, líder del proyecto; la Asociación CRAterre de Francia; las universidades de Florencia y Cagliari en Italia; la Universidad Politécnica de Valencia en España; entre otras.

Sin embargo, han surgido algunos cuestionamientos relativos al estado de la cuestión en referencia al tema de la sostenibilidad de la arquitectura vernácula, y sobre la manera en que se pueden aplicar o no los conocimientos a otros ámbitos de la teoría de la arquitectura. El propio Vellinga (2015), participante en el proyecto VerSus, sostiene que este discurso creciente que relaciona la sostenibilidad con la arquitectura vernácula, está construido sobre algunas limitaciones que hacen que el entendimiento acerca de la sostenibilidad de las tradiciones vernáculas sea parcial y distorsionado. Por otro lado, Arboleda (2008) argumenta que ya no hay una conexión directa entre el manejo de los recursos naturales y lo vernacular indígena, y afirma que los factores de la economía global que están cambiando drásticamente el

planeta, están afectando severamente las prácticas de las culturas tradicionales que habían sido sostenibles, y afirma que estos factores están terminando con la perspectiva sostenible de las prácticas indígenas; y las teorías arquitectónicas y urbanas necesitan integrar una reflexión más profunda sobre los aspectos ambientales, económicos, políticos y sociales de la actualidad en las discusiones sobre la sostenibilidad y las tradiciones indígenas vernáculas.

En cuanto al panorama en nuestro país, pueden detectarse preocupaciones por las tradiciones culturales en varios aspectos desde la época del nacionalismo post-revolucionario. Como ejemplo, en 1922 Gerardo Murillo, el Dr. Atl, publica el libro *Las artes populares*, donde dedica un capítulo a la arquitectura popular. El Instituto Nacional de Bellas Artes, en diversas ocasiones, ha publicado algunos documentos relativos a la arquitectura popular y la conservación del patrimonio. Las reflexiones y sistematización del conocimiento en torno a estos temas en México comienzan con las publicaciones de Valeria Prieto (1978) a partir de iniciativas gubernamentales; de López Morales (1987) desde el gremio profesional, y de Guerrero Baca (1994) desde el ámbito académico. Estas publicaciones son los primeros inventarios de la arquitectura vernácula y contribuyen a la puesta en valor de estas arquitecturas, aunque la mayoría de estos documentos son meramente descriptivos, contribuyen a abrir el camino en torno a las reflexiones sobre el tema. Más recientemente, se pueden identificar algunos trabajos de cuerpos académicos en las Universidades de Colima, en la Autónoma de Yucatán, en la Michoacana de San Nicolás Hidalgo y en la Autónoma Metropolitana;

así como en el Instituto Politécnico Nacional. En la UNAM existen varios trabajos de investigación en tesis de maestría y doctorado, y hay además esfuerzos colegiados que investigan la salvaguarda del patrimonio arquitectónico tanto en el Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje, como en el Posgrado de Arquitectura.

Finalmente, es importante señalar el trabajo desarrollado por profesionales independientes y organizaciones no gubernamentales, que de alguna u otra manera han contribuido a la preservación de este conocimiento ancestral a través del ejercicio profesional y prácticas de trabajo comunitario con diversas comunidades. Este trabajo ha comenzado a documentarse en la Unidad de Ecotecnologías del ahora Instituto de Investigaciones en Ecosistemas de la UNAM en Morelia (Fuentes, Masera y Ortiz, 2014).

### **Pensamiento sistémico**

Así, en medio de este panorama, esta investigación se aborda bajo una perspectiva holística, integral y crítica, basada en el pensamiento sistémico.

La tensión entre el mecanicismo y el holismo ha sido un tema recurrente a lo largo de la historia de la ciencia occidental. La diferencia del pensamiento sistémico respecto al paradigma de pensamiento analítico, se da entre las partes y el todo. El énfasis sobre las partes se ha denominado mecanista, reduccionista o atomista, mientras que el énfasis sobre el todo recibe los nombres de holístico, organicista o ecológico. En la cien-

cia del siglo XX la perspectiva holística ha sido conocida como *sistémica* y el modo de pensar que comporta como *pensamiento sistémico* (Capra y Luisi, 2014: 63).

En esta propuesta, se define un sistema como un todo integrado cuyas propiedades esenciales surgen de las relaciones entre sus partes. Así, el pensamiento sistémico se define como la comprensión de un fenómeno en el contexto de un todo. Comprender las cosas sistémicamente significa colocarlas en un contexto, establecer la naturaleza de sus relaciones.

Según esta perspectiva, las propiedades esenciales de un sistema son propiedades del todo que ninguna de las partes posee. Emergen de las interacciones y relaciones entre las partes, las cuales son llamadas *fenómenos* en esta línea de pensamiento. Estas propiedades son destruidas cuando el sistema es diseccionado, ya sea física o teóricamente, en elementos aislados (Capra y Luisi, 2014). Si bien podemos discernir partes individuales en todo sistema, estas partes no están aisladas y la naturaleza del conjunto es siempre distinta de la mera suma de sus partes. En este planteamiento, las propiedades de las partes sólo se pueden comprender desde la organización del conjunto, por lo tanto, el pensamiento sistémico no se concentra en los componentes básicos, sino en los principios esenciales de organización. El pensamiento sistémico es contextual, pues requiere pensar en términos de relaciones, conexiones y entorno.

### **Memoria biocultural**

Desde la perspectiva biológica, la estructura de cualquier

organismo vivo es el recuento de sus cambios estructurales previos, producto de su historia de interacción con la naturaleza; de esta manera, todos los seres vivos tienen una historia grabada genéticamente; es decir, una memoria que les permite mantenerse y sobrevivir en el mundo en permanente cambio de la naturaleza (Capra y Luisi, 2014). Aunque todas las especies vivientes la tienen, la especie humana es la única que puede hacerla consciente, es decir, revelarse a sí misma, los recuerdos que integran su propia historia con la naturaleza.

### **Memoria**

La memoria (vocablo que deriva del latín *memoria*) es una facultad que le permite al ser humano retener y recordar hechos pasados. La palabra también permite denominar al recuerdo que se hace o al aviso que se da de algo que ya ha ocurrido, y a la exposición de hechos, datos o motivos, es decir, conocimientos, que se refieren a una cuestión determinada. Según estas afirmaciones, la memoria parece estar constituida por dos condiciones o elementos diferentes: por un lado la conservación o persistencia de los conocimientos pasados, que, por ser pasados, deben quedar sustraídos de la vista: a esto se le denomina *retentiva*; y por otro, la posibilidad de reclamar, al necesitarlo, el conocimiento pasado y de hacerlo actual o presente, es decir, el *recuerdo* (Abbagnano, 1963).

Las sociedades poseen también una memoria colectiva, una memoria social. Este término fue acuñado por el filósofo y sociólogo francés Maurice Halbwachs. En los estudios de recuperación de los saberes tradicionales

desde la agroecología, esta capacidad de recordar resulta crucial porque a través de la comprensión del presente, se tienen elementos para la planeación del porvenir que sirven para remontar eventos similares ocurridos anteriormente, y también sucesos inesperados. La memoria de la especie humana es por lo menos, triple: genética, lingüística y cognitiva, y se expresa en la variedad o diversidad de genes, lenguas y conocimientos o sabidurías (Toledo y Barrera, 2008).

Considerando la función de la memoria en una sociedad y su extensión en el tiempo, Stanford Anderson (2005), historiador y teórico de la Arquitectura, distingue entre sociedades que poseen sólo memoria y aquellas que confrontan la memoria con la historia. En una sociedad oral, aún si hay una importante dinámica hacia la comprensión colectiva del pasado, la memoria reside en los individuos. La ausencia de registros contribuye a la modificación de la memoria social y la tradición de generación en generación. El pasado no está separado sino incorporado en el presente. En estas sociedades, la tradición cultural es mantenida en el contexto de los asuntos del presente; y así, el olvido, e incluso olvidar que uno olvida, es tan importante como la memoria misma. Las transformaciones de las formas o prácticas sociales pueden ser notadas o no al momento del evento, pero es improbable que permanezcan en la memoria.

De manera similar, Le Goff, citado por Anderson (2005:157), observa que esta memoria colectiva funciona en las sociedades orales de acuerdo con lo que llama “reconstrucción generativa” que elimina o transforma esas partes de la tradición que ya no son operativas ni útiles.

Por otro lado, las sociedades letradas, siguiendo al mismo autor, no pueden descartar, absorber o transmutar el pasado de la misma manera. En su lugar, sus miembros están enfrentados a versiones del pasado y sus creencias registradas permanentemente, y porque el pasado es así separado del presente, la indagación histórica es posible. Esto estimula el escepticismo; no sólo respecto al pasado legendario, sino también respecto a las ideas recibidas del universo en su totalidad. Así el siguiente paso es construir y probar explicaciones alternativas, dando nacimiento a la tradición intelectual lógica, especializada y acumulativa, y por supuesto las tradiciones intelectuales vigentes hasta hoy.

En estas reflexiones interesa destacar la memoria de la especie humana que se encuentra en la larga y compleja colección de sabidurías locales de cuyo estudio en conjunto se pueden obtener recuerdos claves y sucesos que han ejercido una influencia profunda y duradera en toda la especie; lo que Toledo y Barrera (2008) señalan como el “hipocampo” del cerebro de la humanidad, el reservorio mnemotécnico que permite a toda la especie adaptarse continuamente en un mundo complejo que cambia de manera permanente. Según el mismo autor en otra publicación (Toledo, 2005), señala que:

Las sociedades indígenas albergan un repertorio de conocimiento ecológico que generalmente es local, colectivo, diacrónico y holístico... como poseen una larga historia de práctica en el uso de los recursos, han generado sistemas cognitivos sobre sus propios recursos naturales circundantes que son transmitidos de generación en generación. La transmisión de este conocimiento se

hace mediante el lenguaje.... **La memoria es, por lo tanto, el recurso intelectual más importante entre las culturas indígenas o tradicionales** (pp. 16-19).

Sin embargo, estas culturas corren un gran riesgo de desaparecer ante lo que hoy se entiende por memoria, la memoria que Pierre Nora, historiador francés conocido por sus estudios sobre identidad y memoria, califica como “moderna”, y afirma que la memoria moderna es, ante todo, archivística. Descansa en la materialidad de la huella, la inmediatez de la grabación, la visibilidad de la imagen. Lo que comenzó como escritura, es hoy una grabación de alta fidelidad. Mientras menos memoria se experimenta desde el interior, más existe solamente a través del andamiaje exterior. De ahí la obsesión con el archivo que marca esta época, intentando de una vez la completa conservación del presente así como la preservación total del pasado. La memoria ha sido absorbida por una meticulosa reconstitución, la vocación de la memoria moderna es grabarlo y guardarlo todo, delegando al archivo la responsabilidad de recordar: “*Record as much as you can, something will remain*” (registra lo más que puedas, algo quedará) (Nora, 1989, pp.13-14).

Mientras más desaparece la memoria tradicional, en el sentido definido en párrafos anteriores, más se siente el ser humano obsesivamente obligado a recolectar restos, testimonios, documentos, imágenes, discursos, cualquier signo visible de lo que ha sido, como si este creciente expediente aportara alguna prueba para algún tribunal de la historia.

De ahí la importancia de preservar la memoria de los saberes tradicionales, y los conocimientos y sabidurías que encierran. Para ello, a continuación se presentan una serie de reflexiones sobre la tradición, y su relación con la manera en se aprehende el mundo, ya sea a través del conocimiento y/o de la sabiduría.

### Tradición

Según Nicola Abbagnano, la tradición se define como la herencia cultural, es decir, la transmisión de creencias y técnicas de una a otra generación. J.G. Herder, filósofo alemán precursor del romanticismo, citado por el propio Abbagnano (1963), exalta la tradición como “la sagrada cadena que liga a los hombres con el pasado y que conserva y transmite todo lo hecho por los que le han precedido” (p.1146).

También interesa la definición que hace Georg Wilhelm Friedrich Hegel, filósofo alemán:

La tradición... no es una estatua inmóvil, sino una corriente viva, fluye como un poderoso río cuyo caudal va creciendo a medida que se aleja de su punto de origen... Lo que cada generación crea en el campo de la ciencia y de la producción espiritual es una herencia acumulada por los esfuerzos de todo el mundo anterior, un santuario en el que todas las generaciones humanas han ido colgando, con alegría y gratitud, cuanto les ha sido útil en la vida, lo que han ido arrancando a las profundidades de la naturaleza y del espíritu. Este heredar consiste a la vez en recibir la herencia y en trabajarla (Abbagnano, p. 1147).

La antítesis de esta valoración de la tradición es una concepción que la niega, al afirmar que no todos los resultados o los mejores productos de la actividad humana sean infaliblemente conservados o incrementados en el curso del desarrollo histórico, y que lo conservado de tal desarrollo esté, por sí mismo, garantizado en su verdad o su valor. Esta concepción fue inherente a la Ilustración, inscribiéndose falsamente en contra de la tradición, considerando que lo que ella transmite es, en la mayoría de los casos, error, prejuicio o superstición, apelando, en contra de la misma tradición, al juicio de la razón crítica. Esta es la visión generalizada que permanece hasta el día de hoy, y que acompaña a las definiciones y concepciones de la modernidad; así, hoy en día se considera lo “moderno” como antítesis de lo “tradicional”.

Es en este imaginario colectivo donde se encuentra parte del problema que está destruyendo a las culturas tradicionales, que no toma en cuenta que éstas son portadoras de un conocimiento milenario, construido durante más de 10 mil años de interacción con la naturaleza. Al instalarse la globalización como proceso homogeneizador en todos los ámbitos de la vida humana, se convierte en un fenómeno que atenta contra la memoria de la especie, ya que amenaza toda expresión de diversidad, heterogeneidad y variedad. Tal como afirman Toledo y Barrera (2008), los conocimientos locales son concebidos como arcaicos, primitivos e inútiles. Esta exclusión que arrasa con la memoria de la especie humana en cuanto a sus relaciones históricas con la naturaleza, no hace más que confirmar uno de los rasgos de la modernidad industrial: su desprecio por todo aquello considerado como tradicional. En consecuencia, la ideología del

progreso y del desarrollo convertida en mito supremo, se funda en la supuesta superioridad de lo moderno, el mercado y la tecnología y ciencia contemporáneas, sobre lo tradicional.

Para explicar ahora cuáles son las distintas formas de entender el mundo y las maneras en que la especie humana se ha relacionado con él, se presentan algunas reflexiones sobre conceptos como la información, la sabiduría y el conocimiento, que a su vez se vinculan con las definiciones de tradición y modernidad.

#### Información, conocimiento y sabiduría

¿Cómo se conoce? ¿Qué es la información? ¿Cuál es la distinción entre conocimiento y sabiduría? Al parecer, al menos superficialmente, la relación entre estas tres categorías puede resultar evidente: sin información no hay conocimiento, y sin conocimiento no hay sabiduría. Sin embargo, al estar hoy en día inmersos en un mar de información, se conocen más cosas, pero se “sabe” menos. A pesar de vivir en un mundo donde abunda la información, la humanidad moderna enfrenta una creciente escasez de sabiduría. Comúnmente se piensa que tener acceso a mayor cantidad de información produce más conocimiento, y esto da como resultado, cierta sabiduría. Pero, por el contrario, la información aislada sin el contexto y la interpretación adecuados sólo confunde el entendimiento del mundo en vez de enriquecerlo. De ahí la importancia de reflexionar en términos de conexiones, relaciones y contextos, tal como propone el pensamiento sistémico.

Este es el mecanismo simplista que se cree que opera automáticamente: a mayor información más conocimiento y por lo tanto, más sabiduría. Pero ni la información necesariamente se convierte en conocimiento ni el conocimiento en sabiduría. Por el contrario, la producción casi incalculable de información y de conocimiento que caracteriza al mundo moderno, ha dado lugar a un nuevo tipo de ignorancia letrada, que produce una especie de amnesia colectiva producto de la instantaneidad que gira alrededor de la fabricación continua, masiva y efímera de información.

Por otro lado, de manera general, el conocimiento es definido como un conjunto de informaciones sobre la naturaleza, las cualidades y las relaciones entre las cosas, obtenido generalmente a partir del estudio, y que es almacenado en la memoria, sin pasar necesariamente por una experiencia vital.

La sabiduría, por su parte, es una habilidad que se desarrolla con la aplicación de la inteligencia en la experiencia, obteniendo conclusiones propias que ofrecen un mayor entendimiento que ayuda a reflexionar y discernir sobre lo conveniente o inconveniente de ese conocimiento. Entra aquí una dimensión ética de la que casi siempre carece el conocimiento que no ha pasado por la experiencia.

Es posible sugerir entonces que el conocimiento tiene que ver con recordar y aplicar la información que se produce colectivamente y que la sabiduría tiene que ver más con la asimilación de la experiencia, con la capacidad de ver, descubrir e interpretar la realidad, que da

al conocimiento una dimensión ética a través del actuar.

Un ejemplo claro de sabiduría, en la que el conocimiento conlleva una serie de valores que guían el actuar de los miembros de los pueblos indígenas, es que la tierra y la naturaleza tienen una cualidad sagrada que ha estado prácticamente ausente del pensamiento occidental desde la ilustración, cuando la dimensión ética fue separada al intentar objetivar el mundo. En las culturas indígenas que aún perviven en el planeta, la tierra y la naturaleza en su conjunto son veneradas y respetadas y esta cualidad se refleja en prácticamente todas sus cosmovisiones. No son consideradas meramente como un recurso económico, y su valor no es sólo instrumental. Bajo la gran mayoría de estas cosmovisiones alrededor del mundo, la naturaleza es la fuente primaria de la vida que nutre, sostiene y enseña. Es no sólo un recurso productivo sino el centro del universo, el núcleo de la cultura y el origen de la identidad étnica (Toledo y Barrera, 2008). En estas reflexiones interesan particularmente las comparaciones y distinciones que estos mismos autores hacen entre conocimiento científico y sabidurías tradicionales (nótese la manera en que se nombran: El conocimiento científico como uno, y las sabidurías tradicionales, como varias). En este contexto, conocer y saber son dos modelos ideales y dominantes de aproximación a la realidad, unidos a dos tradiciones intelectuales sobre la comprensión y relación del ser humano con la naturaleza: por un lado, la occidental, cuya versión vigente se remonta apenas al inicio de la revolución industrial, y que detenta una visión instrumental que ha cosificado a la naturaleza considerándola como mero instrumento de uso (**conocimiento**, historia, moderno); y por otro, las

tradiciones cuyo origen se remonta a varios miles de años y se encuentran vivas en el mundo contemporáneo, embebidas en las más de seis mil culturas no-occidentales, es decir, los pueblos indígenas, que coexisten en las áreas rurales de gran parte de las naciones del mundo y que, por resistencia o marginación, han logrado oponerse o evitar la expansión cultural y tecnológica del mundo industrial (**sabiduría**, memoria, tradicional). Estos enclaves todavía mantienen rasgos de civilización tradicionales o no modernos en su interacción con la naturaleza que se remontan al origen mismo de la especie humana y constituyen otra forma de aproximación. Así, existen dos maneras de conocer a la naturaleza: la ciencia moderna fundada en el conocimiento científico, y los saberes tradicionales<sup>5</sup>.

El **conocimiento** se fundamenta en bases científicas compartidas por cierta comunidad de profesionales especializados y reconocidos en algún área epistémica. Está basado en teorías, postulados y leyes sobre el mundo; por lo tanto se supone que es universal y robustecido mediante la autoridad otorgada a dicha comunidad de profesionales especializados. La aplicación del conocimiento como autoridad se realiza de manera impersonal e indirecta con el fin de darle sentido al mundo. El conocimiento se adquiere vía capacitación y profesionalización. Al final, es una creencia fundada en las bases de un razonamiento objetivo. Neutraliza las cosas para intentar separar o tomar distancia de las emociones

y de sus valores. Se separan mente y materia, hecho y valor, cultura y naturaleza, y ésta se concibe como un mundo externo a ser analizado, es decir, fragmentado en su totalidad mediante hechos aislados, en el sentido que expone Capra (1998).

Por otro lado, la **sabiduría** se basa en conocimientos directos, empíricos y repetitivos acerca de las cosas. Las cosmologías juegan un papel sustancial como comunidades epistémicas, funcionando de manera similar a las comunidades especializadas del mundo científico. Se basa también en la experiencia concreta y en las creencias compartidas por los individuos acerca del mundo circundante y es mantenida y robustecida mediante testimonios. La sabiduría, como un testimonio, se enraíza en la experiencia personal y directa con el mundo. Se adquiere a través de la experiencia cotidiana, de la forma de vivir y de mirar las cosas. Es por definición, un razonamiento basado en la experiencia personal y en creencias compartidas más o menos aceptadas.

Los conocimientos tradicionales siempre existen en permanente conexión con otros dos ámbitos: la práctica, que permite la satisfacción de las necesidades materiales de los individuos, y la creencia, que conduce hacia la satisfacción espiritual y, por tanto, ordenan a su vez la vida práctica. Este hecho crucial distingue al cuerpo de conocimiento tradicional de otras formas cognitivas como la ciencia, que objetiva o cosifica y separa, aunque

---

5. Claude Levi-Strauss estableció en su libro *La ciencia salvaje* una distinción entre lo que denominó la “ciencia neolítica” y la “ciencia moderna” (Levi-Strauss, C., 2006).

ahora esta última, a través de la mecánica cuántica, esta aproximándose a la recuperación de puntos de vista más integrales<sup>6</sup>.

Tanto el conocimiento, ligado a la ciencia y la tradición de pensamiento occidental, como la sabiduría unida a las sociedades tradicionales, son formas de creer, reconocer, y significar el mundo, y con frecuencia se olvida que ambas maneras de aproximarse al mundo son el resultado de construcciones culturales específicas desplegadas por distintas sociedades para explicar su propia existencia y entorno, así como para darle sentido a su evolución y construir sus propias estrategias de sobrevivencia. Así, ninguna es superior a la otra, son simplemente diferentes (Toledo y Barrera, 2008).

En resumen, como arquetipos de conocimiento, la ciencia es societaria, universal, general, impersonal, abstracta, teórica y especializada; en cambio, la sabiduría es individual, local, particular o singular, personal, concreta, integral o globalizadora, es decir, holística, y práctica. Es importante señalar que la ciencia no puede reemplazar a la sabiduría, ni ésta a aquélla. Ambas son formas de conocimiento necesarias para la especie (Villoro, 1982).

A nivel tanto social como personal, es posible percibir esa distinción entre conocimiento y sabiduría. Como afirma Pallasmaa (2012):

Todas las profesiones y disciplinas tienen dos dimensiones o categorías de conocimiento: el conocimiento operativo e instrumental y el conocimiento existencial, en diferentes grados y configuraciones. Las dimensiones instrumentales de un oficio pueden ser teorizadas, investigadas, enseñadas e incorporadas a la práctica de una manera bastante racional, mientras que las dimensiones existenciales se integran dentro de la identidad propia de cada uno, de la experiencia vital y del sentido ético, así como de la sensación personal de la misión de cada uno (p. 134).

### **Sabiduría corporal**

Finalmente, es importante reflexionar también sobre la pérdida de tradiciones constructivas, en términos de sus implicaciones globales: lo que se pierde no es sólo una técnica, es un patrimonio cultural. Toledo y Barrera (2008), desde la agroecología, estudian el fenómeno y advierten que “todavía sobreviven en las mentes y en las manos de los miembros de las culturas rurales, un arsenal mnemotécnico de un valor inconmensurable” (p. 14).

Pallasmaa (2012) explora el entendimiento que yace oculto en la parte existencial de la condición humana y sus modos de ser y experimentar específicos. Su objetivo es ayudar a sacudir los cimientos del paradigma de

---

6. No hay que dejar de lado las nuevas aproximaciones de la ciencia a los fenómenos de la realidad, a través del pensamiento sistémico, que se acercan a la manera de ver el mundo de las culturas tradicionales. Para profundizar en estos temas, ver Capra, 2003; y Capra y Luisi, 2014.

conocimiento conceptual, intelectual y verbal en aras de otro conocimiento: el tácito y no conceptual de los procesos corporales. Este conocimiento es el que impera en las tradiciones constructivas: así ha pervivido la transmisión de este conocimiento que está, literalmente, en las manos de quien lo ejecuta.

La pérdida de estas tradiciones constructivas no sólo limita la transferencia de una tecnología, también afecta la transmisión de todo un patrimonio cultural amenazado por las fuerzas de la homogeneización cultural que, en caso de desaparecer, además de perjudicar a las culturas originarias, repercutiría también en el patrimonio de la humanidad. Así, iniciar un proceso de rescate y puesta en valor de estos temas es fundamental, pues se trata de culturas aún vivas cuya transmisión de saberes se hace de manera oral y práctica; que por lo tanto urge documentar, pues constituyen parte importante de la expresión de la diversidad cultural del mundo y también una referencia de nuestra propia existencia, como bien se señala en la Carta del Patrimonio Vernáculo Construido (ICOMOS, 1999).

### **Las sabidurías tradicionales como salvaguarda de la memoria**

¿Por qué es importante conservar las sabidurías tradicionales, difundirlas y mantenerlas vivas? Porque es aquí donde se encuentra la memoria de la humanidad, una memoria procesada, un conocimiento digerido y acumulado a lo largo de miles de años de interacción de los humanos con la naturaleza. Es en la relación entre los seres humanos y los procesos naturales, en ese lugar de

lo cotidiano donde se reproduce la vida misma, en esas sabidurías milenarias largamente ignoradas, devaluadas o malinterpretadas, donde según Toledo y Barrera (2008) se encuentran las claves para remontar la actual crisis ecológica y social desencadenada por la revolución industrial. De aquí la importancia de recuperar las tradiciones y sabidurías constructivas, como una manera de reaprehender el mundo, dejar de cosificarlo, devolverle a la vida como contribución desde el campo de estudio de la arquitectura. Es necesario preservarlas pero no como piezas de museo, no como eventos folclóricos para turismo, ni como curiosidades pintorescas, sino como sistemas de cognición vivos y por ende en constante transformación. Es en estas tradiciones donde es posible encontrar la salida a la crisis multidimensional de la modernidad, es donde se encuentra el conocimiento genuinamente sostenible, producto de los conocimientos que sobre la naturaleza han acumulado las sociedades tradicionales que reflejan la acuciosidad y riqueza de observaciones sobre el entorno realizadas, mantenidas, transmitidas por vía oral de generación en generación y perfeccionadas a través de largos períodos de tiempo, sin las cuales la supervivencia de los grupos humanos no hubiera sido posible.

A partir de ellas y sus sabidurías, es posible generar otras opciones para habitar el mundo, un conjunto de comunidades y sociedades alternativas. No es solamente un tópico técnico, económico, informático o educativo, es una asunto profundamente existencial, pues “toca las fibras más profundas de las relaciones entre la especie humana y la naturaleza y de las relaciones entre los seres humanos” (Toledo y Ortiz, 2014:27). Tal como afirman

Capra y Luisi (2014) una comunidad humana sostenible está diseñada de tal manera que sus formas de vida, de comercio y economía, estructuras físicas y tecnologías respeten, honren y cooperen con la cualidad inherente de la naturaleza para sostener la vida.

Finalmente, en los sistemas constructivos milenarios que anteceden a la revolución industrial y al uso de materiales altamente contaminantes, se encuentra una alternativa más afable para todo el mundo viviente, y por ende, para el ser humano, en la que además permea el pensamiento y sentir de la riqueza de muchas civilizaciones. Al igual que con la lengua, el vestido o la comida, con la forma de construir se expresa una cosmovisión. Como bien afirma Pallasmaa (2012):

Los edificios no son construcciones abstractas carentes de significado o composiciones estéticas, son extensiones y refugios de nuestros cuerpos, de nuestros recuerdos, de nuestras identidades y de nuestras mentes. En consecuencia, la arquitectura surge a partir de confrontaciones, experiencias, recuerdos y aspiraciones existencialmente verdaderas (p. 131).

Mediante esta investigación se busca recuperar esta forma de ver el mundo y la arquitectura a través de los saberes constructivos tradicionales, y remontar las definiciones estáticas que de la arquitectura vernácula se tienen en distintos ámbitos académicos, que enfatizan la ausencia del cambio, como si ésta fuese una pieza muerta en un museo. La interpretación aquí plasmada, por el contrario, concibe la arquitectura vernácula como

una memoria cultural viva, y la intención es contribuir a que permanezca y evolucione dentro de sus propios contextos culturales.

Como nunca antes, el conocimiento y la comprensión de nosotros mismos, y de nuestra historia común como seres humanos, está siendo requerido de manera urgente, ya que tal vez, la pérdida de la memoria como especie, sea la pérdida de nuestra existencia.



**CAPÍTULO 2.**

**LOS SABERES CONSTRUCTIVOS  
TRADICIONALES DE LA REGIÓN  
DE TEPEYAHUALCO**



## 2. LOS SABERES CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES DE LA REGIÓN DE TEPEYAHUALCO

En este capítulo se describe el contexto de la región de estudio, en términos históricos, geográficos y culturales, con el fin de explicar y comprender los saberes constructivos tradicionales del lugar que dieron origen al sistema en estudio, encontrado en la región de Tepeyahualco en el Estado de Puebla, tanto en la cabecera municipal de Tepeyahualco, como en la comunidad de El Fuerte de la Unión. Si bien es un sistema de edificación relativamente reciente según los datos encontrados en trabajo de campo, ya que data de principios del siglo XX, se infiere que ha sido conformado a partir de la fusión de las técnicas de construcción más antiguas desarrolladas en la misma región. Esta hipótesis se detallará en el tercer capítulo de esta investigación.

### Antecedentes históricos de la región

“En la redondez de los cerros” es el significado del antiguo nombre Tepeyaguhualua atendiendo a sus raíces nahuas *tepetl*: cerro y *yaguhualua*: cosa redonda, de donde deriva el vocablo que los españoles no pudieron pronunciar y deformaron como Tepeyahualco. La población se ubica en la zona noreste del Estado de Puebla, a 85 km de la ciudad de Puebla (Fig. 1). Tepeyahualco de Hidalgo es la capital del municipio del mismo nombre.

La mayoría de los asentamientos que se formaron en el valle poblano-tlaxcalteca fueron grupos de recolectores y cazadores provenientes del Valle de

Tehuacán, del Río Salado y de la Cuenca de México, agrupándose en la fundación de la gran ciudad que hoy se conoce como Cantona. Aunque oficialmente se le conoce con este nombre, algunos investigadores, como el cronista de Tepeyahualco, Don Agustín Cervantes (2014) sostienen que el sitio se llamó *Tepeyaguhualua*, y que el nombre de Cantona o Cantonak aludía a un lugar mítico. Esta ciudad estuvo asentada sobre un embalsamamiento volcánico de seis erupciones que sucedieron hace más de treinta mil años. En su época de mayor esplendor fue habitada por cerca de 90,000 personas.

Una vez consumada la conquista de México, el antiguo señorío de Tepeyahualco sufrió la misma suerte que otros señoríos indígenas; sus pocos habitantes fueron desplazados de su lugar original de asentamiento a la ubicación actual de la población de Tepeyahualco (Cervantes, 2014); aunque para este momento, la ciudad de Cantona estaba ya prácticamente deshabitada, pues según datos del arqueólogo Ángel García Cook (2014), la ciudad fue abandonada hacia el año 1050 de nuestra era.

Al parecer la fundación formal de Tepeyahualco data del año de 1566, por cédula real concedida por el virrey Gastón de Peralta, marqués de Falces. Es el momento también en que la localidad vivirá tiempos de auge económico gracias a su estratégica ubicación al borde del Camino Real, habilitado por las autoridades virreinales para comunicar a la Ciudad de México, centro rector del virreinato, con el puerto de Veracruz, hasta entonces única puerta de salida y enlace con España. (Cervantes, 2014). Este camino fue consolidado a partir de las rutas establecidas por las culturas mesoamericanas



Fig. 1. Mapa de la región donde pueden apreciarse las poblaciones de Tepeyahualco, El Fuerte de la Unión, la ciudad prehispánica de Cantona y San Andrés Payuca. Al norte puede apreciarse el embalsamamiento volcánico producto del volcán de los humeros (Imagen: Google Earth, 2019, editada por Karen Aimeé Mendoza)

de las provincias tributarias del Golfo de México que comunicaban con México-Tenochtitlan (Muñoz, 2006), aunque según García Martínez (2001):

Cuando (Cortés) alcanzó la orilla del altiplano (en un punto entre el Pico de Orizaba y el Cofre de Perote) vio materialmente esfumarse los tenues caminos que venía siguiendo, ... había llegado a una zona despoblada, la cuenca del Seco, carente de aguas superficiales y que no se ocupó ni cultivó sino hasta años después, cuando los españoles perforaron pozos profundos (p. 46) (Figs. 3 y 4).

El relato de Cortés llama la atención: “desde aquí anduve tres jornadas de despoblado y tierra inhabitable a causa de su esterilidad y falta de agua y muy grande frialdad que en ella hay, donde Dios sabe cuánto trabajo la gente padeció de sed y de hambre”. (García Martínez, 2001, p. 46).

Este trayecto también era conocido como el camino de las Ventas, y tenía dos vertientes, vía Córdoba o vía Perote; el trayecto duraba 22 días recorriendo 412 km. La ruta que pasaba por Tepeyahualco, vía Perote, tenía el siguiente recorrido: Veracruz, Antigua, Jalapa, Perote, Huamantla, Apizaco, Calpulalpan, Totolcingo y la

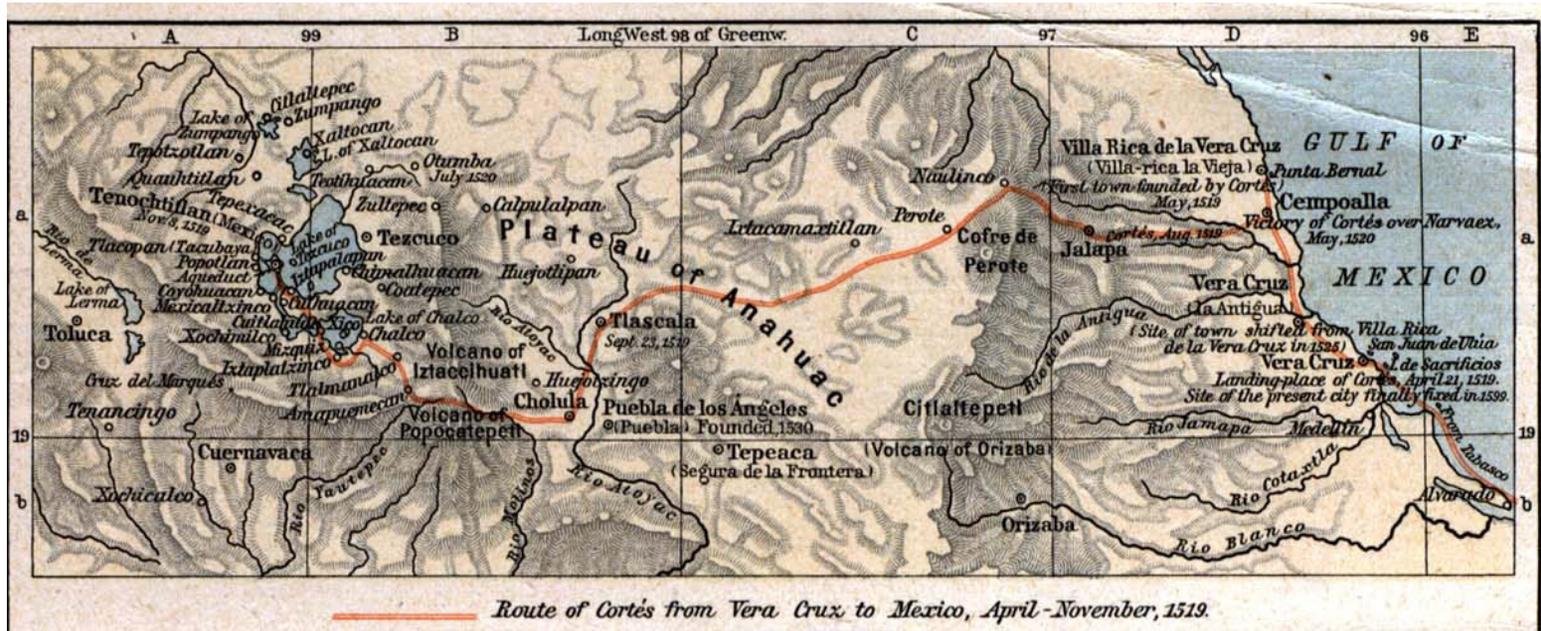


Fig. 2. Ruta del Camino Real (Fuente: <http://www.mexicomaxico.org/Tenoch/RutaCortes1519.jpg>, fecha de consulta: 8 enero 2018)

entrada a la Ciudad de México era por la calzada de Guadalupe (Muñoz, 2006).

Debido a que Tepeyahualco se encontraba en el punto medio del Camino Real (fig. 2) se inició la construcción de ventas, postas y mesones donde se ofrecían alimentos y hospedaje para continuar el viaje. El más importante de ellos fue el mesón que ocasionalmente servía de “Palacio Virreinal”, pues en él se daba de comer al virrey en turno en su viaje a la Ciudad de México; y que después se convertiría en una hacienda de beneficio. Es así que inicia la tradición constructiva de Tepeyahualco, donde se desarrollaron las diversas técnicas que se detallan más adelante en este mismo capítulo (Figs. 5 y 6).

La otra comunidad donde se desarrollaron las tapias en estudio, El Fuerte de la Unión, localizada a 11 km de Tepeyahualco, se originó a finales de la Revolución Mexicana, en 1920, debido a un hecho fortuito que buscaba proteger el paso del entonces Presidente Venustiano Caranza hacia la sierra norte de Puebla, del ataque sorpresivo de las fuerzas de Guadalupe Sánchez (Cervantes, 2014). El campamento surgido en este lugar, fue consolidándose poco a poco hasta convertirse en un poblado, construido en su mayor parte con las tapias de piedra pómez y cal, solo que, a diferencia de Tepeyahualco, en esta localidad se utiliza cal del bulto y arena, en sustitución del residuo de cal. A la fecha, las bardas perimetrales de los lotes, así como gran parte de la vivienda del pueblo han sido manufacturados con estas tapias. Su población vive, como antaño, de la agricultura y la ganadería, además del comercio y el transporte (Figs. 7 y 8).



Fig. 3. Cuenca del Seco, también llamada cuenca oriental. Foto de Google Earth editada por Diego Andrés García Ruíz.



Fig. 4. Paisaje del malpaís con el cerro Pizarro al fondo. (Fotografías: Acervo del LABPySCT)



Fig. 5 Imagen de Tepyahualco, plaza principal (Fotografía: acervo del LABPySCT)



Fig. 7. Imágenes de El Fuerte de la Unión (Fotografías: Acervo del LABPySCT)



Fig 6. Imagen de Tepyahualco, calle típica. (Fotografía: acervo del LABPySCT)



Fig. 8. Imágenes de El Fuerte de la Unión (Fotografías: Acervo del LABPySCT)

## Contexto geográfico

Como ya se mencionó, el municipio de Tepeyahualco se localiza en la parte noreste del Estado de Puebla. La altura promedio del municipio oscila entre los 2,300 y los 3,100 msnm. Colinda al norte con el municipio de Chignautla, al sur con los de Guadalupe Victoria, Oriental y San Nicolás Buenos Aires, todos ellos pertenecientes al estado de Puebla; al este con el municipio de Perote en estado de Veracruz y con el de Xiutetelco, Puebla; y al oeste con Libres y Cuyoaco, también municipios poblanos. Tiene una superficie de 426.08 kilómetros cuadrados. La cabecera es la comunidad de Tepeyahualco (Fig 13).

### Orografía

La formación geológica del municipio data del cuaternario, encontrándose como vestigios de este periodo formativo una variedad de rocas intrusivas y extrusivas como el granito, la toba ácida, el basalto, la toba básica y distintas variedades de brecha volcánica, de donde proceden los materiales volcánicos del sistema en estudio; así como variedades de calizas sedimentarias, de donde proviene la materia prima para la fabricación de la cal, y suelos lacustres y aluviales, de donde se extrae el barro, llamado renegrado en la región, debido a su color oscuro. Hoy en día existe una calera que fue fundada a principios del siglo XX, y que antiguamente era la hacienda beneficiadora de metales, en donde se produce un excedente de cal, que es el residuo del proceso de fabricación de hidróxido de calcio, el cual es aprovechado en la construcción de la tapia en estudio (Figs. 9 a 12).



Figs. 9 y 10. Canteras de piedra pómez y cacaahuatillo (fotografía: acervo del LABPySCT)

La principal característica hidrográfica del municipio es la existencia de la laguna intermitente de El Salado, de 7.5 kilómetros de largo y dos de ancho, y que ocupa una de las zonas más deprimidas de la cuenca endorreica de los Llanos de San Juan; presenta a su alrededor una gran área que se mantiene en inundación temporalmente. También destacan las lagunas de la Unión y de Alchichica, que ocupa el cráter del mismo nombre (Fig. 14).

Numerosas corrientes intermitentes se originan en los cerros Pizarro, Pinto y las Sierras del sureste y suroeste, pero después de un corto recorrido por el valle desaparecen.

El norte del municipio tampoco presenta corrientes superficiales bien definidas, pues sus características geológicas lo impiden, sin embargo, no deja de contar con cortos y escasos arroyos intermitentes además de húmeros, de origen volcánico.

## Clima

El clima dominante es el templado-frío en el área de estudio, con temperatura promedio anual de entre 14.5 y 16°C; y una precipitación pluvial promedio de 395 mm al año (Fig. 15). La humedad relativa promedio es de 20%.

En el municipio se presenta la transición de los climas secos de los Llanos de San Juan, a los templados de la Sierra Norte. Así, se identifican dos climas: clima semiseco templado que se presenta al sur y que abar-



Figs. 11 y 12. Cantera de piedra caliza y residuos de la fabricación de cal (fotografía: acervo del LABPySCT)



**Población total**

- De 1 a 100
- De 101 a 250
- De 251 a 500
- De 501 a 1,000
- De 1,001 a 2,500
- De 2,501 a 5,000
- De 5,001 y más
- Cabecera municipal

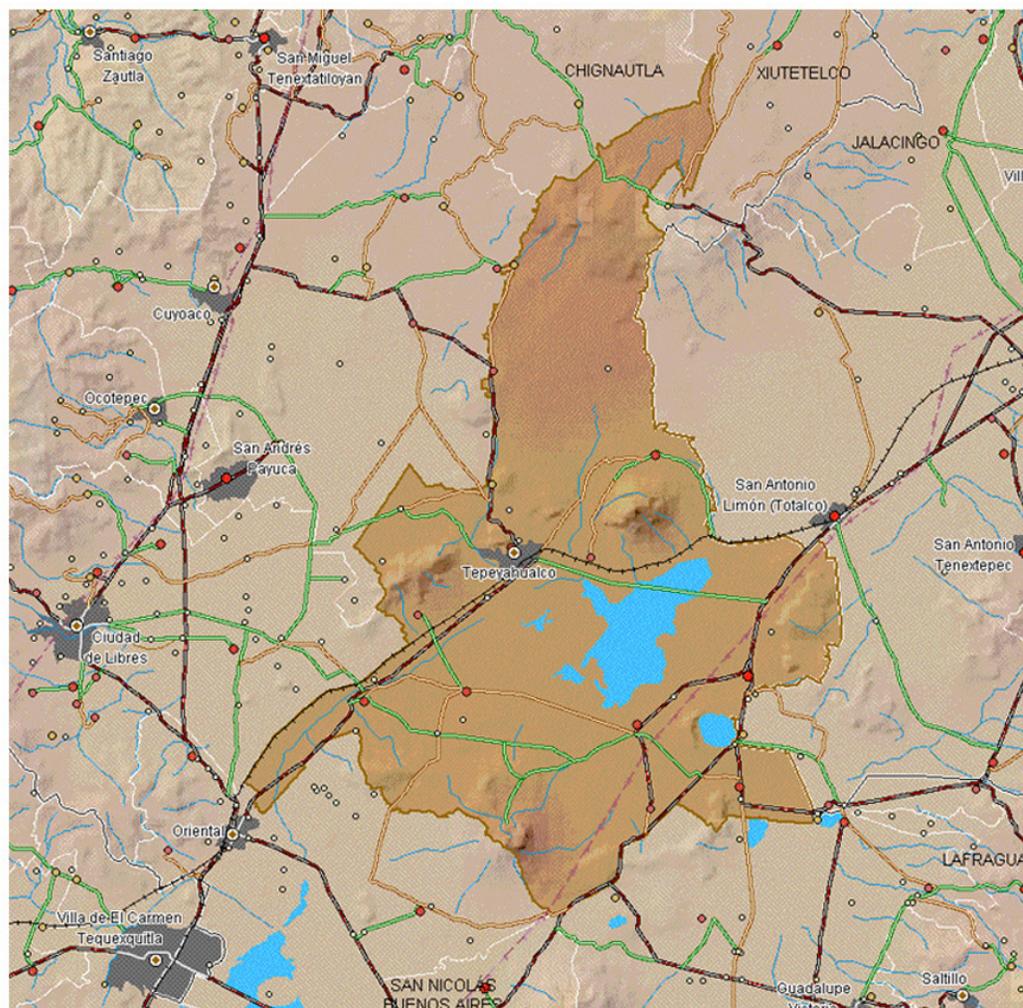


Fig. 13. Mapa del municipio de Tepeyahualco, donde se observa la ubicación y las características geográficas de la zona de estudio (fuente: INEGI. Marco geoestadístico municipal, 2009. <http://www.microrregiones.gob.mx/zap/zapmapas/base2011/g21170>. Fecha de consulta: marzo 2019)

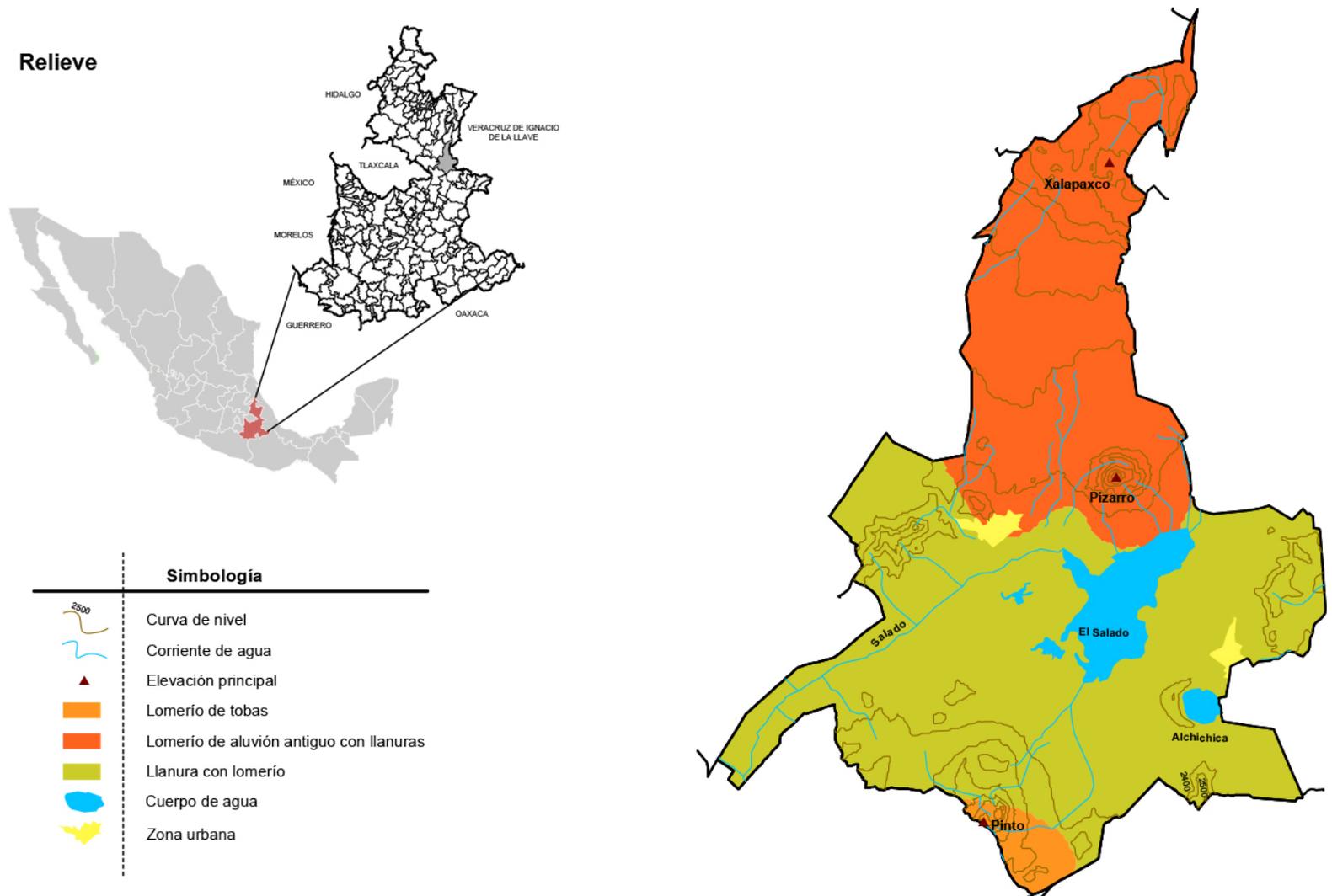


Fig. 14. Mapa hidrogáfico y de relieve del municipio de Tepeyahualco. (fuente: INEGI. Marco geoestadístico municipal, 2009. [http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/21/21170.pdf](http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21170.pdf) Fecha de consulta: 26 de marzo de 2019

ca 70% del territorio municipal, el cual es el que afecta a la zona de estudio y que corresponde a la clasificación BSk (semi-árido frío, según la clasificación de Köppen); y clima templado subhúmedo con lluvias en verano, en la parte septentrional y en el extremo norte del municipio, abarcando el 30% del área municipal (Fig. 16).

### Vegetación

El municipio presenta gran diversidad vegetativa y de uso del suelo: el cerro Pinto, la cumbre del cerro Pizarro, parte de la sierra que se levanta al oeste de Tepeyahualco, la cumbre del cerro Las Águilas y áreas dispersas del norte del municipio, están cubiertas de bosques de pino y ocasionalmente de táscate también conocido como sabino. En estos bosques las especies que predominan son: pino, sauce, pirul, ocote, piñonero, palmilla, soyate, táscate o sabino, izote, escobilla, jarilla, y algunos frutales como capulín, durazno, ciruela y chabacano.

Grandes zonas de matorral desértico receptófilo cubren las laderas del cerro Pizarro, del cráter de la laguna de Alchichica, el cerro Siete Cuevas, las laderas del cerro Las Águilas y parte del Malpaís<sup>7</sup>, que se presenta al norte, donde existen especies tales como el soyate, táscate o sabino, izote y maguey.

Entremezclados entre los bosques de pino y el matorral desértico rosetófilo, aparecen grandes áreas de pastizal inducido y en los alrededores de la laguna El Salado pastizal inducido halófilo (Fig. 17).

La fauna predominante en el municipio es conejo, coyote, liebre, zorrillo, tlacuache, zorra, mapache, diversas aves entre ellas el zopilote y el gavilán, y gran diversidad de víboras.

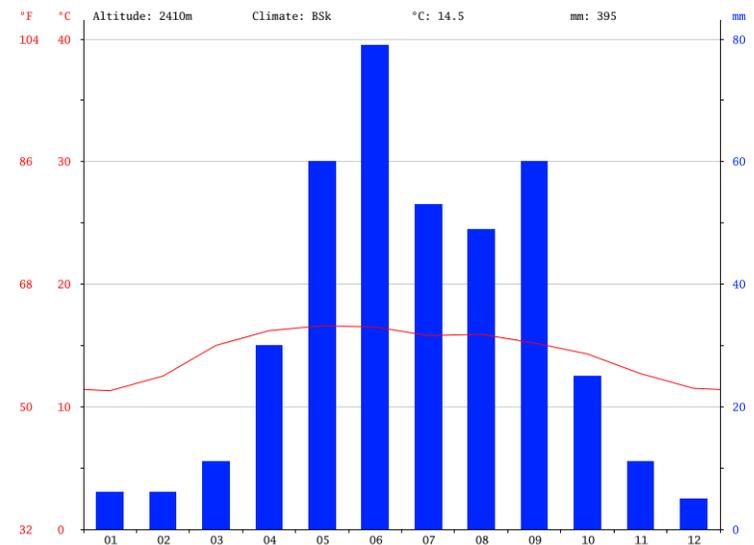


Fig. 15. Climograma de Tepeyahualco. (fuente: climate-data.org; fecha de consulta: 26 de marzo de 2019)

7. Se le llama malpaís al terreno abrupto, árido y casi estéril constituido por lava volcánica reciente fragmentada en bloques, con vegetación limitada debido a la escasez de tierra.

## Climas

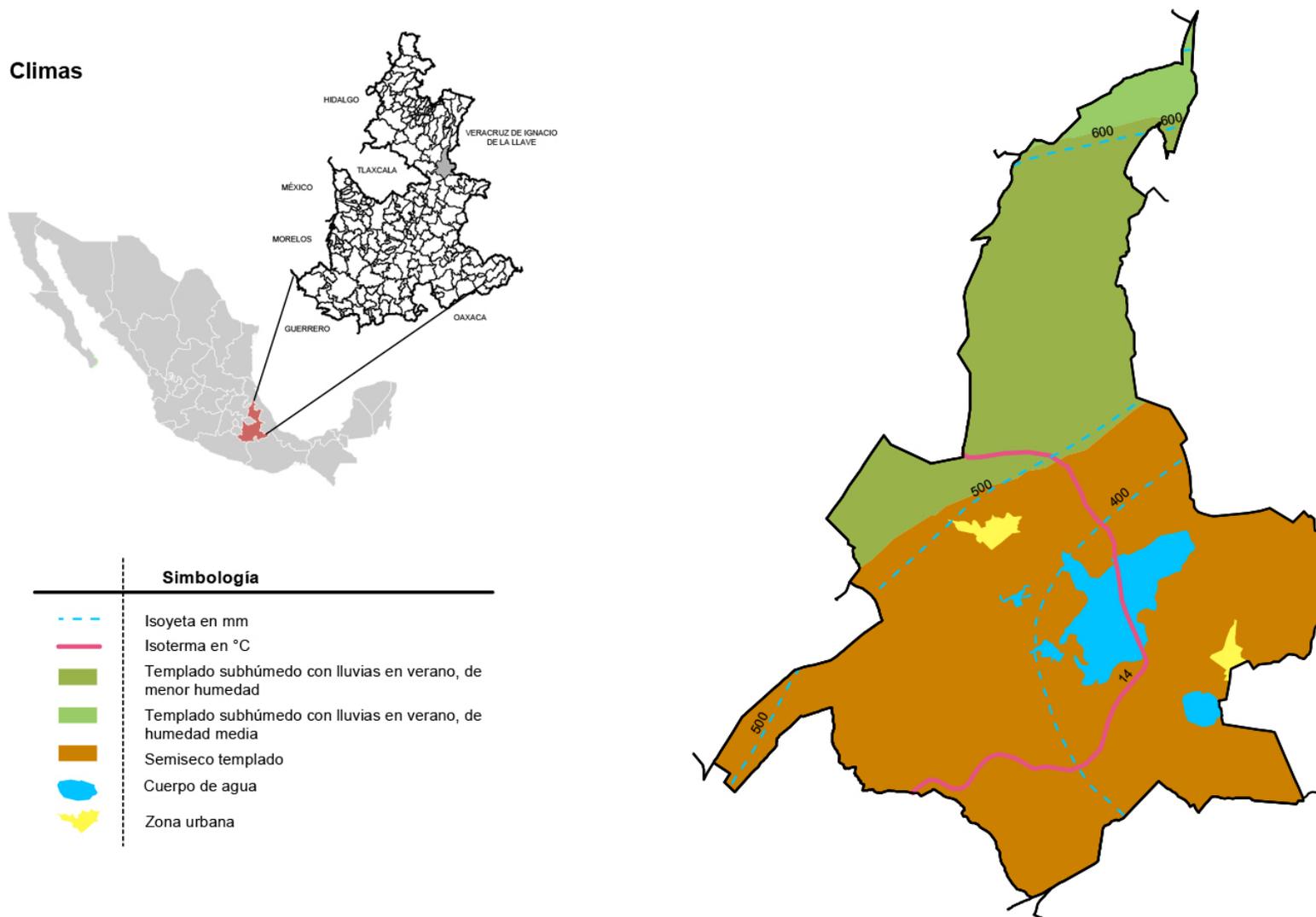


Fig. 16. Mapa de climas del municipio de Tepayahualco. (fuente: INEGI. Marco geoestadístico municipal, 2009. [http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/21/21170.pdf](http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21170.pdf) Fecha de consulta: 26 de marzo de 2019)

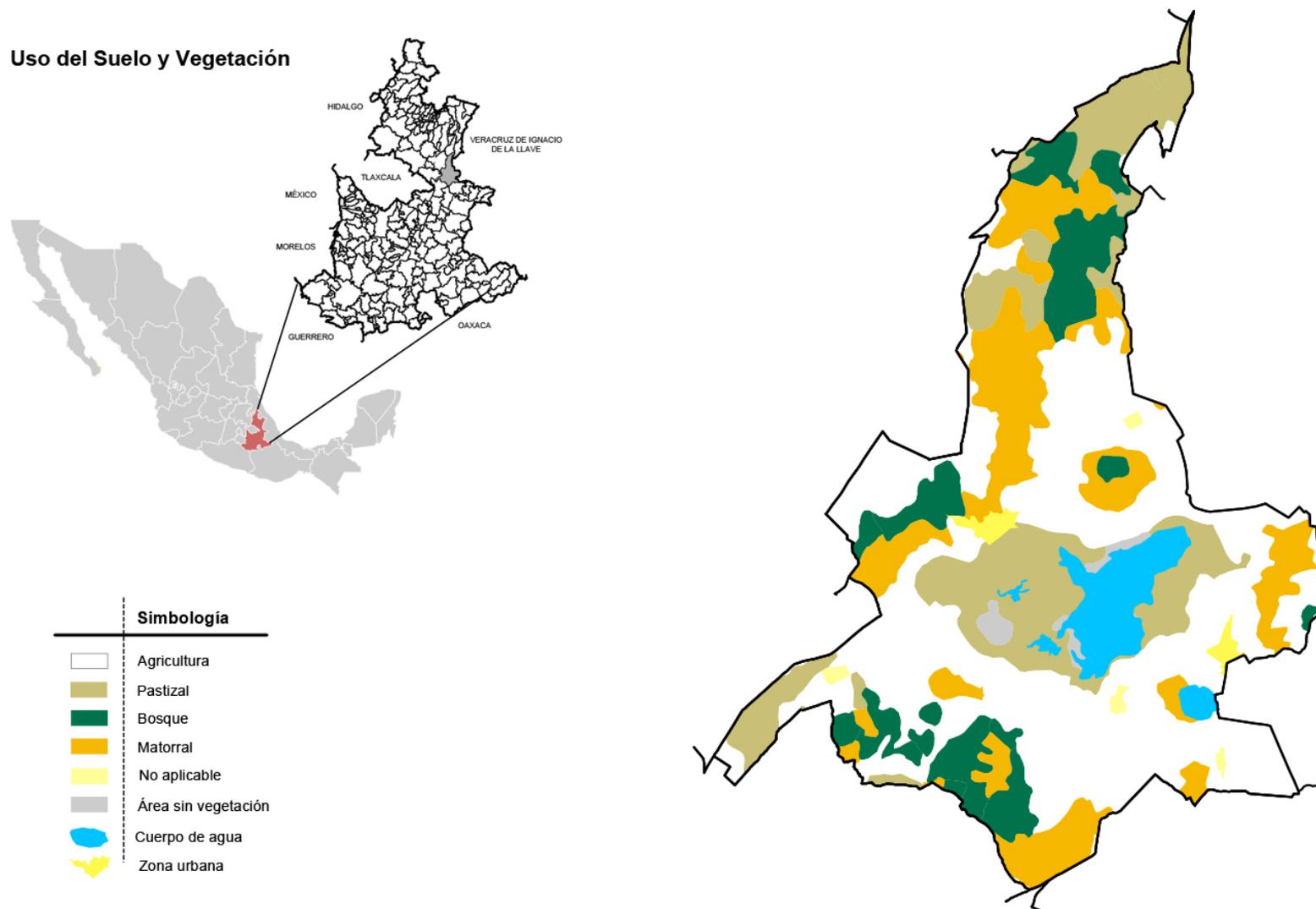


Fig. 17. Mapa de vegetación y uso del suelo. (Fuente: INEGI. Marco geoestadístico municipal, 2009. [http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/21/21170.pdf](http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21170.pdf) fecha de consulta: 26 de marzo de 2019)

Estas condiciones climáticas y ambientales han generado una arquitectura local de techos casi planos, muros con alta inercia térmica, masivos, y el uso de estructuras de madera ha sido limitado, debido a la escasez del material en las zonas aledañas. El recurso más socorrido para la edificación de techumbres eran la palmilla, el soyate y los izotes disponibles en el malpaís, cuyos troncos y fibras se utilizaban tanto para la estructura como para los recubrimientos.

### **Sistemas constructivos de la región**

A continuación se describen los sistemas constructivos más utilizados en la demarcación, que son producto de los recursos naturales, del clima y de las condiciones físicas del lugar; así como de las técnicas desarrolladas tanto por los pueblos prehispánicos, como por los españoles y que fueron implementadas en la región a raíz de la conquista. Los procedimientos constructivos estudiados son la piedra apilada, la piedra cementada con cal, las tapias de tierra y los terrados para las cubiertas; y son descritos con el fin de comprender de mejor manera el origen de las tapias en estudio.

#### **Piedra Apilada**

La piedra apilada fue el sistema constructivo característico de la ciudad prehispánica de Cantona (Figs. 18 y 19). El diseño arquitectónico y constructivo de sus edificaciones se caracteriza por la ausencia de cementantes o aglutinantes, solamente se utilizaban rocas volcánicas en talud y paramento, es decir, buscando la inclinación adecuada para que las piedras no se deslicen ni provoquen



Fig. 18. Cantona, piedra apilada (fotografía: Ángeles Vizcarra)



Fig. 19. Cantona, piedra apilada (fotografía: Ángeles Vizcarra)

la caída de los muros, además de estar trabadas entre sí mediante cantos de menor tamaño (Cervantes, 2014).

El basalto se utilizó para núcleos y construcciones en general, la roca de tezontle careado se colocó como recubrimiento en los taludes de las plataformas de sus edificios principales; la cantera, también careada, fue utilizada en los peldaños de las escaleras en algunas alfardas y para los pisos de las plazas y superficies de los cuerpos de las pirámides; y la caliza blanca para elementos arquitectónicos con carácter ceremonial, como altares, discos en canchas de juego de pelota o para marcar enterramientos humanos o de ofrendas (Figs. 20 y 21).

Según García Cook (2014), los habitantes de Cantona no utilizaron cementantes o argamasas por desconocimiento o falta de materia prima, sino por la escasez de agua. Según las investigaciones arqueológicas, el lecho de agua más cercano a la ciudad se encontraba a 10 km de distancia.

Así, los cantoneses se convirtieron en expertos constructores de estructuras arquitectónicas sin la utilización de argamasas. Pese a ello, se encontraron pisos tanto de lodo como de estuco al interior de las pirámides, lo que indica que para ceremonias rituales sí utilizaron argamasas a base de lodo y de cal, y que sí tenían el conocimiento necesario para su producción y uso, sobre todo para la fabricación de cal.



Figs. 20 y 21. Cantona (fotografía: Ángeles Vizcarra)

## Piedra y cal

Uno de los materiales más utilizados en la construcción de edificios históricos ha sido la piedra natural, que era considerada un material de mayor calidad y símbolo de mayor rango social que la tierra tanto cruda como cocida.

En lo que se ha podido observar en la arquitectura de los tiempos de la conquista en Tepeyahualco, prevaleció la construcción con piedra sin labrar, a pesar de la tradición constructiva de piedra labrada proveniente de Cantona.

La mayoría de las construcciones de la colonia, entre ellas la iglesia, las antiguas postas, casonas y mesones para albergar a los viajeros que transitaban por el Camino Real, y posteriormente las edificaciones de las haciendas, están hechas de mampostería de piedra, ya sea caliza, basalto y en algunos casos granito, unidas con mortero de cal y recubiertas en su mayoría con una capa de piedra volcánica, en este caso, piedra pómez, tepojal o tezontle, y cal. Se infiere que este mortero se utilizaba para emparejar la piedra no labrada, además de otorgar una mayor protección contra las inclemencias del clima.

Agustín Cervantes (2014) relata que los albañiles en tiempos de la colonia ya conocían los secretos de la cal, que extraían de las rocas calizas de los cerros cercanos y la fabricaban en hornos de leña. Afirma también (comunicación personal en entrevista, 2014), que cada hacienda tenía su horno, y en ellos la piedra se cocía con leña. El proceso tardaba aproximadamente siete días.



Figs. 22 y 23. Construcciones en Tepeyahualco, donde se aprecia la construcción con piedra, al quedar los muros sin el recubrimiento de cal.

Por otro lado, Cervantes también afirma en la misma entrevista que “desde la conquista se hacían encofrados rellenos con piedra maciza volcánica, del malpaís”. Así, en la colonia se construían muros de roca volcánica con encofrados, a la manera de las tapias de cal y canto desarrolladas en España, también llamadas mampostería encofrada (Figs. 22 y 23).

Llama la atención la mezcla de piedras utilizadas en las construcciones, lo que permite inferir que efectivamente se trataba de encofrados, aunque no queda huella de la unión entre bloques, debido probablemente al recubrimiento de pómez y cal; sin embargo, la mezcla de piedras y el descuido en el careo, la disposición irregular y la forma de las mismas son indicios que permiten hacer tal inferencia (Figs. 24 y 25).



Figs. 24 y 25 Detalle de los muros donde se aprecian los distintos tipos de piedra empleados en los muros, y el recubrimiento de piedra pómez y/o tepojal.



Figs. 26 y 27. Edificios en Tepayahualco que aún conservan el recubrimiento de cal (fotografías: acervo del LABPySCT)



Fig. 28



Fig. 29



Fig. 31



Fig. 30

Figs. 28 a 31. En estas fotografías pueden apreciarse las diferentes combinaciones de piedra, tanto en tipo como en tamaño, lo que refuerza la hipótesis de que pudieron ser construidas, algunas de ellas, mediante el sistema de tapia de cal y canto. Ésta es una constante que se presenta en todas las edificaciones analizadas en el trabajo de campo. (Fotografías: acervo del LABPySCT).

## Tapias de Tierra

La tierra apisonada, comprimida, compactada, o mejor conocida en México y países de habla hispana como tapial o muro de tapia, es una unidad monolítica construida a partir de tierra dispersa previamente seleccionada, la cual es vertida dentro de una cimbra o encofrado. Esta cimbra se rigidiza para no modificar la forma de la tapia durante el apisonado de las capas de tierra dispersa, compactando cada una de ellas con un pisón hasta llenar el encofrado y así formar la tapia.

Este muro se caracteriza por su forma de prisma rectangular con un espesor que oscila entre 40 y 80 cm dependiendo de las características de la edificación (alturas, claros, dimensiones). Las proporciones del encofrado normalmente están relacionadas tanto con una lógica estructural como antropométrica para facilitar su manipulación, traslado y fácil manejo durante la construcción. Los métodos, técnicas y herramientas para hacer tapias han evolucionado a largo del tiempo, pero siempre basados en el mismo principio: compactar un material disperso para que alcance una densificación mayor y en consecuencia, una mayor estabilidad (Fig. 32).

La arquitectura de tapia en México ha sido poco documentada. La tradición constructiva que probablemente tuvo su origen en la época virreinal se distribuyó sólo en la región del Camino Real, descrito en la primera parte de este capítulo. Tepeyahualco se encuentra aproximadamente a la mitad de esta antigua ruta (Fig. 2), lo que propició el desarrollo local de la técnica, que fue introducida por los soldados españoles, al ser utilizada principalmente por el gremio militar, para



Fig. 32. Muro tradicional de tapia de tierra en San Andrés Payuca, Puebla, México (Fotografía: acervo del LABPySCT)

la construcción de murallas y estructuras defensivas de las que queda poco rastro, salvo la fortaleza de San Carlos en Perote, Veracruz; localizada a 30 km de Tepeyahualco (Fig. 33). A pesar de su valor patrimonial lamentablemente esta cultura constructiva se está perdiendo a un ritmo muy acelerado, a consecuencia del desarrollo de sistemas constructivos industrializados. Tanto en Tepeyahualco como en El Fuerte de la Unión, los remanentes de esta técnica son realmente escasos (Figs. 34 y 35).

El desarrollo de este sistema constructivo en México ha tenido diversos puntos de partida en diferentes tiempos históricos, aunque no con las características exactas como se conoce hoy en día. Existen varias nociones acerca de esta técnica desde tiempos prehispánicos. Una de ellas se identifica en el año de 300 d.C., cuando la cultura Olmeca-Xicallanca construyó los



Fig. 33. Fortaleza San Carlos, Perote, Veracruz (Fuente: <http://cronicadexalapa.com/cierran-fortaleza-de-san-carlos/> fecha de consulta: 18 abril 2019)



Fig. 34. Restos de Tapia en la comunidad de El Fuerte de la Unión. (Fotografía: acervo del LABPySCT)



Fig. 35. Restos de Tapia en Tepeyahualco, México (Fotografía: acervo del LABPySCT)

cimientos de la zona de Cacaxtla mediante la compactación de tierra, al parecer sin cimbra, pero con las técnicas de compactación del material. También existieron otras aproximaciones como la técnica de moldeado en húmedo o la de barro colado, documentadas en el sitio arqueológico de Paquimé, en el Estado de Chihuahua, alrededor del año 1200 d.C. (Guerrero, 2011) (Fig. 36).

Fue hasta la llegada de la cultura española, que se consolidó esta práctica constructiva en nuestro país, a través de la fusión de diferentes técnicas constructivas existentes en el continente americano junto con las tecnologías provenientes del continente europeo. A pesar de que en la etapa colonial muchos prototipos arquitectónicos principalmente religiosos fueron impuestos por los conquistadores, la misma práctica de



Fig. 36. Paquime, Chihuahua, México (Fotografía: Ángeles Vizcarra).

los obreros americanos sirvió para asimilar y experimentar con el sistema constructivo de tapia; así, fue integrándose en la cultura a través del tiempo tanto en el continente americano como en México.

En el periodo del México colonial, el sistema constructivo de tapia fue utilizado para diferentes tipos de edificios, como bardas para limitar y proteger los predios, muros perimetrales en vivienda, muros divisorios y en una escala mayor templos religiosos, haciendas, casonas y edificios públicos; y en infraestructura vial e hidráulica en combinación con otras técnicas y sistemas constructivos.

Otra fuente particular dentro de la evolución de la tapia en México, fue la influencia arquitectónica y tecnológica por parte de Francia que llegó a finales del siglo XIX. Alrededor de los años 1840 y 1850 se construyeron una gran cantidad de haciendas, donde el uso de la tapia fue muy significativo (Guerrero, 2011). (Figs. 37 y 38).

La trascendencia de la tapia también se vio reflejada en la vivienda popular de la época colonial, ya que la práctica de este sistema constructivo fue incorporada a la vida cotidiana convirtiéndola en una forma tradicional de edificar, debido en parte a la viabilidad económica de construir con este material, disponible casi en cualquier sitio, y con la ventaja de requerir muy poca agua para su manufactura, además de la posibilidad de reutilizar la cimbra de madera varias veces. De esta forma las tapias adquirieron presencia dentro de la arquitectura vernácula de México, incorporándose a la memoria y tradición constructiva de los pueblos donde se desarrolló (Figs. 39 y 40).



Figs. 37. Tapias de la ex hacienda de Mazapa, Tlaxcala.  
(Fotografías: acervo del LABPySCT)



Fig. 38. Tapias de la ex hacienda de Ixtafiyuca, Tlaxcala.  
(Fotografías: acervo del LABPySCT)



Fig. 39. Arquitectura doméstica rural en el estado de Puebla, hecha con tapias de tierra. (Fotografías: acervo del LABPySCT)



Fig. 40. Arquitectura doméstica rural en el estado de Puebla, hecha con tapias de tierra. (Fotografías: acervo del LABPySCT)

## Techumbres y entrepisos

En cuanto a las techumbres y los entrepisos desarrollados en la región, la mayoría eran planos, debido a la poca cantidad de lluvia que se tiene durante el año, con estructuras de viguería de madera, que soportan en la mayoría de los casos un entramado ligero de tabletas de madera conocidas como tejamanil, colocadas de forma transversal o diagonal sobre la viguería; sobre las que se disponen terrados que en la región emplean un sustrato de piedra pómez, tepojal o tezontle y cal, en lugar de las capas de tierra compactada. Como capa final, se da un acabado de cal, según puede apreciarse en las fotografías de la documentación en campo, que sirve también para dar la pendiente para el desagüe. Sobre el terrado se construye un pretil hecho normalmente de piedra pómez con cal, con el fin de proteger las orillas.

Los terrados tienen una pendiente que oscila entre el 2 y el 5%, la cual es producto de la inclinación dada a las vigas, o de una mayor acumulación del relleno en uno de los extremos de la techumbre, que es la solución más socorrida en la zona de estudio. Una inclinación inferior puede provocar un encharcamiento del terrado mientras que una superior facilita el arrastre de los materiales de relleno, aunque en el caso de estudio es menos probable que esto suceda, ya que la cal y las piedras volcánicas empleadas, forman una reacción puzolánica (ver capítulo 4), que forma una roca similar a un concreto pobre, llamado concreto ciclópeo o romano (Figs. 41 y 42). Esta mezcla representa varias ventajas sobre los terrados de tierra compactada, ya que requiere menos mantenimiento, las cargas de la cubierta son más ligeras, y a diferencia de

los terrados de tierra, no es necesario agregar capas de material periódicamente por el desgaste de la capa terrosa debido al paso del tiempo. Otro factor que aligera el peso es la utilización de piedra pómez, tepojal o tezontle, cuya densidad es menor con respecto a la tierra compactada. Los terrados de tierra inicialmente tienen un espesor de 8 a 10 cm, que suele incrementarse debido a las razones antes descritas. Los terrados de Tepeyahualco, tienen un espesor de 12 a 16 cm debido a la granulometría de los agregados volcánicos, según puede apreciarse en las imágenes 46 y 47.



Fig. 41. Sistema de vigas de madera que sostiene la cubierta. (Fotografía: acervo del LABPySCT)



Figs. 42 y 43. Techumbre en ruinas donde puede apreciarse el sistema constructivo de las cubiertas: vigería de madera con una capa de tejamanil y las capas de terrado de piedras volcánicas y cal. (Fotografías: acervo del LABPySCT).



Figs. 44 y 45. En la imagen 44, puede apreciarse cómo el terrado de la cubierta se sostiene aún sin el apoyo de las vigas y el tejamanil, lo que demuestra la resistencia de la combinación de materiales. En la imagen siguiente, se aprecia el detalle de los materiales en una construcción demolida: piedra pómez y tepojal, con una mezcla de cal y arena. (Fotografías: acervo del LABPySCT).



Esta descripción de los sistemas constructivos desarrollados en la región de Tepeyahualco a lo largo de la historia, sirve como preámbulo y apoyo para una mejor comprensión del sistema constructivo en estudio. Éste se analiza con detalle en el siguiente capítulo, y se hacen algunas reflexiones sobre cómo estas técnicas y su transformación contribuyeron al surgimiento de las tapias de cal, piedra pómez y barro.



Figs. 46 y 47. En estas imágenes de una construcción cuya cubierta fue demolida, puede apreciarse el espesor de los terrados, que oscila entre 12 y 16 cm (Fotografías: acervo del LABPySCT).

**CAPÍTULO 3.**  
**LAS TAPIAS DE TEPEYAHUALCO**  
**Y EL FUERTE DE LA UNIÓN**



### 3. LAS TAPIAS DE TEPEYAHUALCO Y EL FUERTE DE LA UNIÓN

En las localidades de Tepeyahualco y El Fuerte de la Unión, descritas en el capítulo anterior, se encontró una variante muy interesante de la técnica constructiva del tapial de tierra. Esta tapia conserva el mismo procedimiento constructivo que las tapias de tierra, pero modifica los materiales del muro. La tierra ha sido complementada y en algunos casos sustituida por una mezcla de residuos de cal y una piedra ligera producto de la espuma volcánica, la piedra pómez, que en el sitio es llamada piedra poma. Esta mezcla era utilizada en los terrados de cubiertas y entrepisos descritos en el capítulo anterior. Este hecho, aunado a la continuidad del uso del encofrado para hacer el muro, permite aseverar que esta técnica es producto de una evolución de las arquitecturas tradicionales del municipio de Tepeyahualco, y que a diferencia de lo que se observa en la mayoría de las tradiciones constructivas de nuestro país, ha encontrado una manera de transformarse, sin el riesgo de desaparecer. Este fenómeno es digno de estudiarse con el fin de contribuir al rescate y actualización de las culturas y tradiciones constructivas de México.

En este capítulo se exponen los resultados de la investigación de campo, la cual consistió en documentar el sistema constructivo y sus procedimientos mediante fotografías, levantamientos, recopilación de muestras de materiales; y por otro, entrevistar a maestros constructores del lugar que dominan la técnica. Éstos narraron con detalle el procedimiento, además de reproducir el sistema constructivo en el sitio, el cual fue



Fig. 48. Tapia de piedra pómez y cal. Hacienda Pizarro, Tepeyahualco. (Fotografía: Acervo del LABPySCT)



Fig. 49. Tapias de El Fuerte La Unión. (Fotografía: acervo del LABPySCT)

videograbado. Para documentar y sistematizar la información derivada de los puntos anteriores, se desarrollaron dos instrumentos que han permitido la recolección, clasificación y organización de la información y posteriormente su correlación.

El primero de ellos es un formato de registro donde se plasmaron los levantamientos, fotografías y dibujos. El segundo, una entrevista con un formato abierto, que permitió la recolección del saber tradicional sobre los sistemas constructivos de viva voz de sus productores, a través de la cual se documentaron con precisión los procesos, detalles y algunas experiencias derivadas de la colectividad que fueron fundamentales para la comprensión del sistema. Se realizaron dos entrevistas videograbadas a maestros constructores de la región; la primera de ellas, hecha a Don Agustín Cervantes (Fig. 50.), narra el procedimiento constructivo de la tapia de piedra pómez y los terrados de cal y piedra; y la segunda, realizada al maestro constructor Guadalupe Reyes (Fig. 51), da cuenta del proceso constructivo detallado mediante la reproducción *in situ* de una tapia escala 1:1 de 2.10 m x 1.10 m y 0.25 m de espesor<sup>8</sup>.

Por otro lado, se elaboraron las fichas de registro en campo para ambos tapias, así como el levantamiento fotográfico de Tepeyahualco, El fuerte de la Unión y sus alrededores.



Figura 50. Don Agustín Cervantes, cronista de Tepeyahualco y maestro constructor (Fotografía: acervo del LABPySCT)



Figura 51. Don Guadalupe Reyes, maestro constructor de Tepeyahualco (Fotografía: acervo del LABPySCT)

---

8. Para ver las entrevistas resumidas, consultar la página web del laboratorio: <https://arquitectura.unam.mx/procedimientos-y-sistemas-constructivos.html>

## Surgimiento del sistema constructivo

Las tapias de piedra pómez y residuos de cal, son de origen relativamente reciente. Según los datos encontrados en trabajo de campo, este sistema constructivo surge a principios del siglo XX en las localidades de El Fuerte de la Unión y en Tepeyahualco; con el fin de satisfacer una demanda rápida y eficaz de construcción popular, para la fundación del poblado de El Fuerte de la Unión, tal como se explica en el capítulo anterior. Esta manera de construir ha sido conformada a partir del aprendizaje y la fusión de dos técnicas constructivas tradicionales de mayor antigüedad presentes también tanto en Tepeyahualco como en el norte de Puebla, y que han sido descritas en el capítulo anterior: por un lado, del sistema de entrepisos y techos planos que se conoce comúnmente como terrados, que en esta zona emplean un sustrato de piedra poma y cal (ver capítulo 2, imágenes 41 a 47), toma la combinación de materiales; y por otro, de los muros de tapia de tierra empleados en la misma región en poblados localizados a unos cuantos kilómetros de distancia, utiliza el encofrado de madera para cimbrar los muros (Fig. 52). El resultado es un muro de un espesor casi 50% menor al de las tapias de tierra cruda -25 a 30 cm vs. 50 a 60 cm- que continúa utilizando materiales locales, conserva la sencillez en el proceso de ejecución y como sus predecesores, no requiere herramientas sofisticadas.

## Tipología arquitectónica

En cuanto a la tipología arquitectónica construida con este sistema en el área de estudio, se encontraron viviendas bastante precarias, la mayoría de una sola habitación, y bardas para la delimitación de los predios. Este hecho puede deberse a que este sistema constructivo surgió



Figura 52. Fabricación de tapia de tierra, San Andrés Payuca, Puebla. (Fotografía: Acervo del LABPySCT)

para resolver un problema de emergencia, hecho con los materiales que se tenían a la mano y que resultaban los más económicos.

Posteriormente, y dadas las características de las tapias, fabricadas con residuos y pocos recursos, el sistema constructivo fue apropiado para la autoconstrucción y utilizado principalmente para resolver problemas de vivienda emergente, lo que ha dado como resultado una arquitectura bastante pobre en términos espaciales, pero en mi opinión, con mucho potencial, como se irá explicando a lo largo de la investigación. La tipología arquitectónica es muy sencilla, normalmente son construcciones de un solo cuarto con la estructura de la techumbre de madera, generalmente morillos del jote del maguey, y el terrado o capa de compresión de la

misma mezcla de la tapia (Figs. 53 y 54). En construcciones más recientes se documentaron algunos casos de cubiertas en las que los morillos son sustituidos por varillas de acero al interior de la mezcla, tal como sucede con las losas de concreto armado, pero se observó que las losas se han pandeado debido a que la mezcla no contiene suficiente aglomerante, en este caso la cal, y que en el caso de utilizar este sistema –losas de concreto armadas con acero- probablemente sea necesario utilizar cemento, a reserva de hacer algunas pruebas de laboratorio. Así, se infiere que al escasear la madera, la techumbre no ha podido ser resuelta del todo, dando como consecuencia el abandono de esta manera de construir para la vivienda, y que la aplicación principal y más común hoy en día haya derivado sólo en elementos para delimitar los predios, conformando así la imagen urbana de la comunidad de El Fuerte de la Unión. Es importante señalar que se encontraron bardas de 50 metros de largo por tres de alto, sin ningún refuerzo intermedio, lo que indica la resistencia del sistema y da un indicio del potencial que puede tener para otros usos.

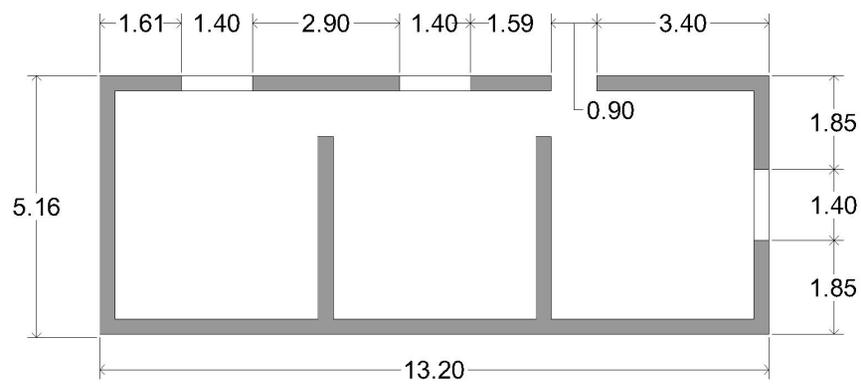
Una de las viviendas documentadas, presentada en este documento (Figs. 55 a 57), cuenta con tres habitaciones. Desafortunadamente la vivienda se encuentra en ruinas, ya sin la cubierta, sin embargo, resulta muy útil para estudiar los contrapeos de los muros (Figs. 83 a 88 en págs. 72 y 73) y la manera de modular las tapias para confinar los espacios, así como la mejor manera de resolver los vanos para puertas y ventanas. Éstas suelen colocarse al centro del muro, y tienen la dimensión de una tapia. Los claros de las habitaciones no superan los cuatro metros, debido a la dificultad para techar los espacios ya expuesta líneas arriba, sin embargo, como lo demuestran las largas bardas, en principio los muros no representarían gran problema para generar espacios de mayores dimensiones.



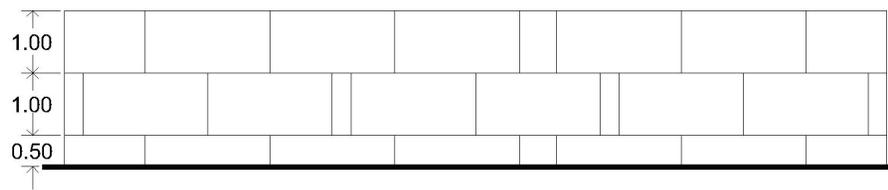
Figura 53. Casa típica de Tepeyahualco hecha con la tapia en estudio. (Fotografía: Acervo del LABPySCT)



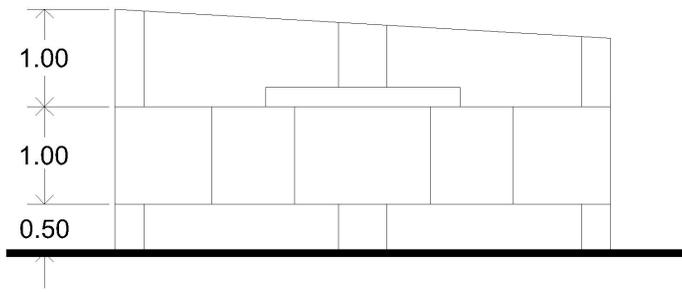
Figura 54. Techo de viguería y entortado de cal y piedra pómez en vivienda de la comunidad de El Fuerte (Fotografía: Acervo del LABPySCT)



Planta



Alzado Longitudinal



Alzado Transversal

Figura. 55. Planta y alzados de vivienda documentada en la comunidad de El Fuerte (Gráficos: Acervo del LABPySCT).



Figura. 56. Vista exterior de vivienda documentada en la comunidad de El Fuerte (Fotografías: Acervo del LABPySCT)



Figura. 57 Vista interior de vivienda documentada en la comunidad de El Fuerte (Fotografías: Acervo del LABPySCT)

## Caracterización de los materiales y ubicación de los bancos de obtención

La técnica que se ha desarrollado de manera tradicional en la región conserva el mismo procedimiento constructivo de muros de tapia convencionales pero incorpora materiales derivados tanto del entorno natural del sitio como de desechos de la industria calera que se ubica ahí desde hace décadas, en el edificio que antes ocupaba una fundición de metales, debido a los grandes yacimientos de roca caliza (Fig. 58).

La tierra ha sido complementada y en algunos casos sustituida con una mezcla de residuos de cal llamado excedente de cal en la región y tres tipos de materiales rocosos triturados, que son producto de la actividad volcánica. El primero de ellos es la pumita, pumicita o piedra pómez (Fig. 59), a la que localmente se le conoce como piedra poma. El segundo material es la roca ígnea intrusiva llamada regionalmente tezontle que es una especie de espuma de lava de color negro o rojizo, menos ligero y poroso que la pumita. (Fig. 60). Finalmente, el tercer material volcánico que se emplea tiene una composición química parecida a la pumita pero por efectos ambientales presenta una estructura cristalina discontinua con mayor porosidad y presencia de arcillas, y se le llama genéricamente tepojal, tepezil o cacahuatillo en la localidad (Fig. 61).

Por otra parte, un componente esencial del sistema lo constituye el residuo del proceso de fabricación de cal aérea. Este material se compone mayormente de arenas de la roca caliza que no alcanzó a calcinarse en el proceso



Figura 58. La calera “Cales de Tepeyahualco” (Fotografía: Acervo del LABPySCT)



Fig. 59. Pumita, pumicita o piedra pómez, conocida como piedra poma en la localidad. (Fotografía: Acervo del LABPySCT)



Fig. 60. Tezontle (Fotografía: Acervo del LABPySCT)



Fig. 61. Cacahuatillo, tepojal o tepetzil. (Fotografía: Acervo del LABPySCT)

de obtención de la cal. Sin embargo, se ha visto que por haber sido térmicamente alterado, adquiere propiedades ligeramente aglutinantes por carbonatación, ya que contiene fracciones que sí alcanzaron la temperatura necesaria para convertirse en óxido de calcio, con lo que adquirieron propiedades reactivas. Otro factor que contribuye a darle propiedades aglutinantes, es la reacción puzolánica que se lleva a cabo entre estas fracciones de óxido e hidróxido de calcio y los agregados de origen volcánico. Se calcula que esta mezcla de residuos de cal tiene aproximadamente un 85% de partículas inertes – arenas de roca caliza triturada- y un 15% de óxido e hidróxido de calcio. Estos aspectos serán explicados y analizados con detalle en los siguientes capítulos. (Figs. 62 y 63).

El excedente de cal representa un factor clave en la fabricación de las tapias de poma. A partir de la creación de la calera y la producción del excedente de cal, se intensificó la práctica y uso del sistema constructivo, ya que se contaba con material para su fabricación y presentaba mejores características en la resistencia a compresión y mejor respuesta ante los agentes erosivos, en comparación con las tapias de tierra. Es importante destacar el gran potencial de enormes cantidades de desperdicio de la calera, ya que mediante el estudio detallado de su composición y su efecto en las tapias, puede convertirse en un recurso mucho más efectivo, susceptible de utilizarse en otras maneras de construir.

Finalmente, también se emplea tierra de alto contenido limoso llamada en la localidad *barro renegrado*, debido a su color oscuro. Proviene de las partes bajas de las montañas, donde este material se sedimenta.

Además de la reacción química entre la cal y el material volcánico que explica en gran medida la dureza y consistencia que muestran los muros de tapia de la región, existe una amplia gama granulométrica que permite la óptima densificación durante el compactado. La piedra pómez y el tepojal se agregan en partículas de muy diferentes tamaños que, por la geometría irregular de sus caras y aristas se traban entre ellas (Fig. 65).

La fricción entre los diferentes componentes aunada a la densificación por la inclusión de arenas finas presentes en el excedente de cal que rellenan los huecos, el aglutinamiento de la arcilla presente en la tierra, y el proceso de puzolanización que será explicado en el siguiente capítulo, le confieren al sistema notables cualidades resistentes.

Estos materiales volcánicos, al igual que la tierra, son de fácil extracción y transformación manual, lo que permitió su desarrollo regional en diversos tipos de viviendas y espacios de trabajo, realizados principalmente por autoconstrucción. La mayoría de los bancos de materiales se encuentran en un radio de cinco km a la redonda del poblado de Tepeyahualco: la piedra caliza para la fabricación de la cal se obtiene de montes que se encuentran a menos de dos kilómetros; la tierra proviene de las partes bajas de las montañas, cuyo banco se ubica en la carretera hacia Cantona a un kilómetro de Tepeyahualco, a un costado del cerro "Tepeyahualquense"; y las rocas volcánicas, de una cantera ubicada a unos cuantos kilómetros de Tepeyahualco, al lado del cerro Pizarro (Fig. 64).



Figs. 62 y 63. Residuos del proceso de calcinación de la roca caliza, llamado en la localidad excedente de cal. En la imagen 62 puede observarse la capa exterior que ha endurecido, producto de la carbonatación al estar en contacto con el aire. Los puntos blancos que se observan en la imagen 63 son las partículas de óxido e hidróxido de calcio presentes en el remanente. (Fotografías: Acervo del LABPySCT)

## Tipos de suelo

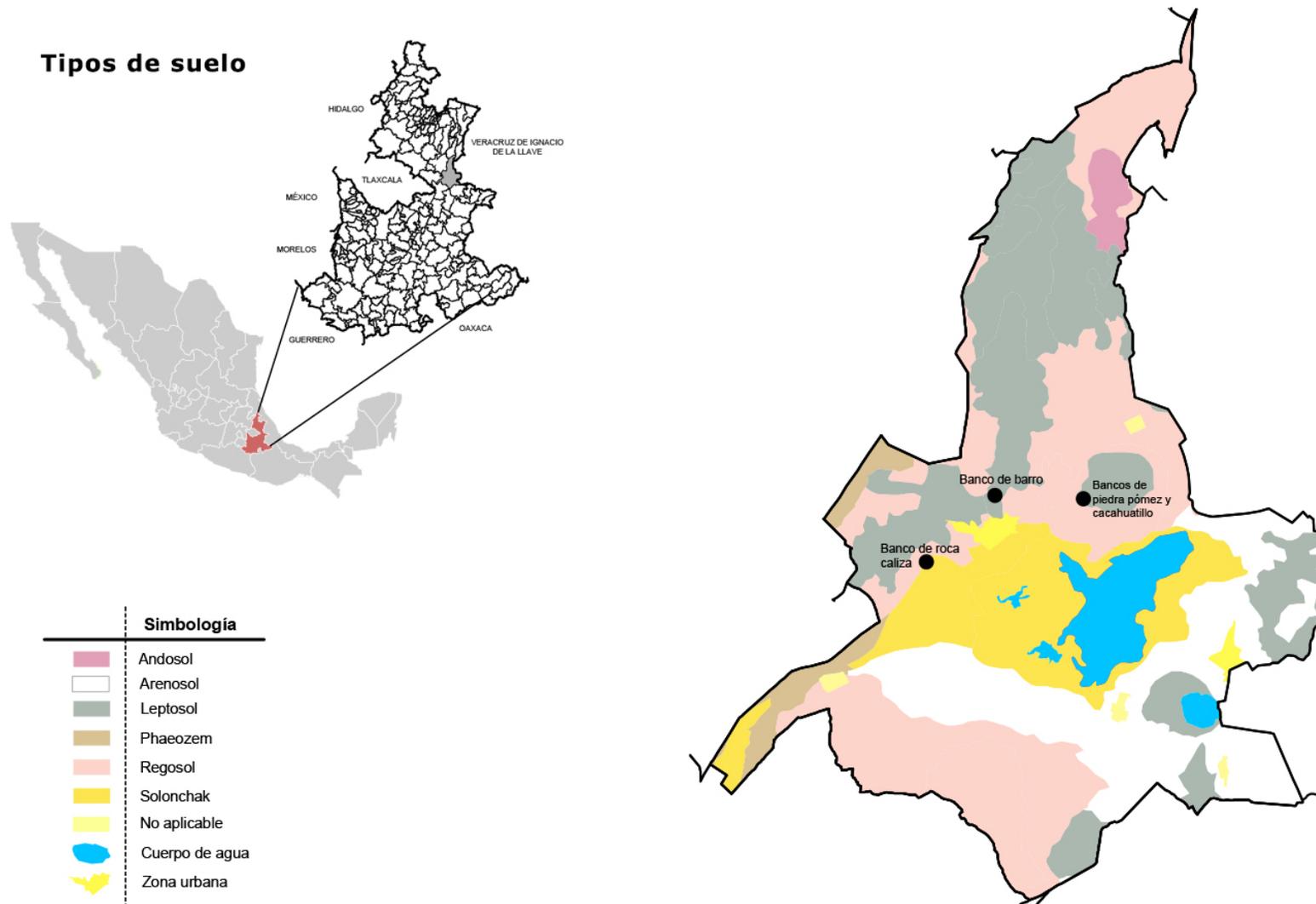


Fig. 64. Mapa de ubicación de tipos de suelo y de materiales y canteras en el municipio de Tepayahualco. (fuente: INEGI. Marco geoestadístico municipal, 2009. [http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/21/21170.pdf](http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21170.pdf) Fecha de consulta: 26 de marzo de 2019)



Fig. 65. Detalle de los distintos tipos de granulometría de los componentes, en una tapia recién fabricada. (Fotografías: Acervo del LABPySCT)



Fig. 67. Cantera de piedra caliza (Fotografía: acervo del LABPySCT)



Figs. 66. Cantera de piedra poma y cacahuatillo (fotografía: acervo del LABPySCT)



Fig. 68. Barro renegrido. (Fotografía: acervo del LABPySCT)



Fig. 69. Residuos de la fabricación de cal. (Fotografía: acervo del LABPySCT)

Es pertinente aclarar que la práctica de la tapia no se inició a la par de la calera; un sistema constructivo muy parecido a éste ya se practicaba con anterioridad a partir de tierra, piedra pómez, cacahuatillo o tepojal, basalto y en algunos casos cal producida de forma artesanal en hornos pertenecientes a las haciendas de la época de la colonia. Este sistema, llamado cal y canto en España, ha sido descrito en el capítulo anterior.

Esta singular combinación de componentes y la permanencia en el uso convencional de pisones y encofrados permite aseverar que se trata del proceso de evolución de una técnica tradicional, que ha encontrado una manera de adaptarse sin desaparecer.



Fig.70. Cimentación. (Fotografía: acervo del LABPySCT)

## Procedimiento constructivo

Los elementos necesarios para fabricar el tapial de piedra poma son un encofrado hecho de madera, ya sea de triplay o tablones, palos de madera o morillos que ayudan a rigidizar los tablones, la cuerda que mantiene fijos a los palos y por último los bastones hechos de varilla roscada de 3/8", los cuales mantienen unido el encofrado para evitar deformaciones durante el apisonado de las capas del material. Es importante mencionar que los primeros encofrados eran hechos en su totalidad de madera y se utilizaban sogas para rigidizarlo. En la actualidad también se utilizan en la región cimbras metálicas.

Para apisonar la mezcla se emplea un pisón de madera o de metal. Para revolver la mezcla se utiliza pico y pala, y para verterla en el encofrado, una pala y un bote.

Las dimensiones del encofrado son normalmente de 2.00 m de largo por 1.00 m de alto y el espesor para estas tapias ronda los 25 cm.

Para hacer la cimentación se cava una cepa que oscila entre 50 cm a un metro de profundidad, hasta encontrar suelo firme; por 50 cm de ancho aproximadamente (Fig. 70). Dentro de la cepa se arma el molde, cajón, cimbra o encofrado, también conocido como tapial, descrito en el párrafo anterior. En el caso documentado, las dimensiones del tapial se hicieron de 2.10 m de largo, 1.10 m de altura, y 0.25 m de espesor. (Figs. 71 y 72).



Fig.71. Cimentación. (Fotografía: acervo del LABPySCT)



Fig. 72. Encofrado de madera, se aprecian los puntales de madera para evitar el movimiento del cajón al momento de apisonar (Fotografía: acervo del LABPySCT)



Fig. 73. Tirantes metálicos interiores para evitar deformaciones del tapial. (Fotografías: acervo del LABPySCT)

Una vez terminado el encofrado, se hace la mezcla en seco de los materiales descritos en los párrafos anteriores, con las siguientes proporciones: un volumen de excedente de cal, un volumen de piedra poma, un volumen de cacahuatillo, 1/3 de volumen de tierra limosa o barro renegrido. Una vez mezclados en seco, se agrega agua rociada, en una proporción aproximada del 5% del volumen de los materiales en seco. Esta cantidad depende de múltiples factores, tales como la humedad de los materiales y la del ambiente. El agua se agrega hasta obtener una consistencia húmeda, con las siguientes características, según narran los maestros constructores entrevistados:

“Se trata de usar la menor cantidad de agua, nada más que quede una mezcla homogénea, pero que no quede con mucha agua, que al tomar una porción de la mezcla en las manos y apretarla, no escurra agua, y queden los materiales cohesionados”

(Cervantes, comunicación personal en entrevista, 2014) (ver fig. 76).

La piedra pómez y el cacahuatillo deberán ser de diferentes tamaños para que el bloque tenga mayor consistencia. La poma llega a medir hasta 15 cm; mientras que el cacahuatillo tiene menores dimensiones, aproximadamente de 1 a 5 cm de diámetro (figs. 59 a 61). Por otro lado, es necesario eliminar la capa superficial del excedente de cal que ha estado en contacto con el aire, pues esta capa, ya endurecida, ha fraguado en la presencia del aire si ha habido suficiente humedad (figs. 62 y 63). Cabe aclarar que existen ligeras variantes en las mezclas utilizadas en la región, que serán descritas en el apartado siguiente. Estas variantes tienen implicaciones en las cualidades estructurales del sistema constructivo, particularmente en las resistencias mecánicas a la compresión, que serán analizadas en el capítulo 5.



Fig. 74. Materiales de la tapia y mezclado en seco. (Fotografías: acervo del LABPySCT)



Fig. 75. Materiales de la tapia y mezclados en seco. (Fotografías: acervo del LABPySCT)



Fig.77. Proceso constructivo: apisonado (Fotografías: acervo del LABPySCT)



Fig. 76. Materiales mezclados con el grado exacto de humedad. (Fotografía: acervo del LABPySCT)



Fig.78. Proceso constructivo: terminado. (Fotografías: acervo del LABPySCT)

Una vez hecha la mezcla, se humedece el terreno donde se colocó el encofrado, para que éste no absorba la humedad de la mezcla. El cajón también se humedece por los mismos motivos y para evitar la adherencia de la mezcla; y se deposita en capas de 15 a 20 cm de espesor, compactando cada estrato, y teniendo especial cuidado en la compactación de las esquinas (figs. 77, 78 y 80).

Una vez lleno el cajón se emparea la superficie con cuchara, se retira la cimbra y se recorre sobre la cepa de cimentación, dejando un espacio del tamaño de una tapia para dar tiempo a que seque el primer bloque (fig. 81). Una vez que el bloque ha adquirido mayor dureza mediante el secado, puede hacerse la tapia adyacente. Es por esta razón que deben construirse alternadamente (fig. 79).



Fig. 80. Proceso constructivo: vaciado de la mezcla y apisonado (Fotografías: acervo del LABPySCT)



Fig. 79. Alternancia en la construcción de los bloques de tapia, para permitir el proceso de secado. (Fotografía: acervo del LABPySCT)



Fig. 81. Proceso constructivo: descimbrado y tapia terminada (Fotografías: acervo del LABPySCT)

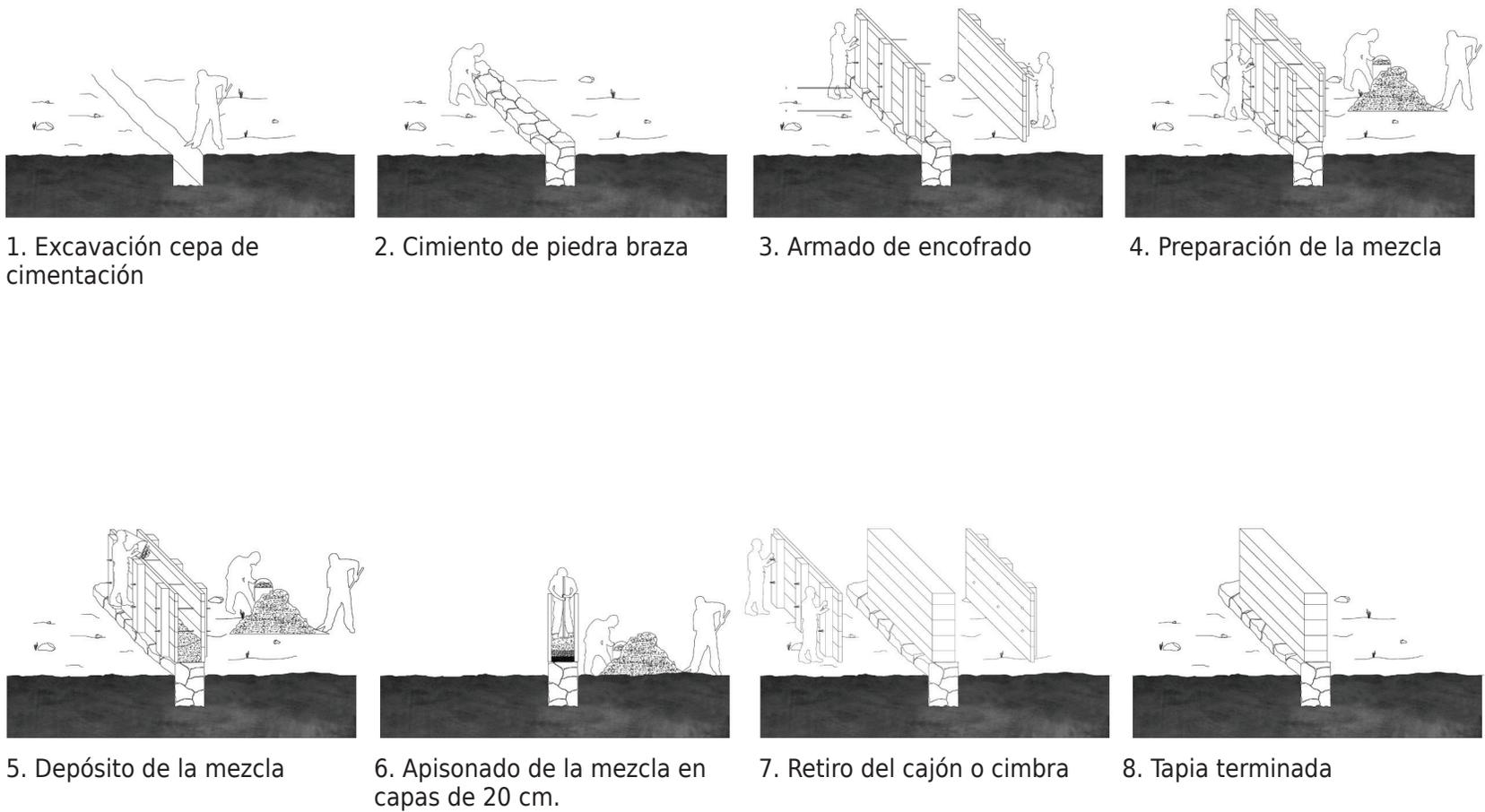
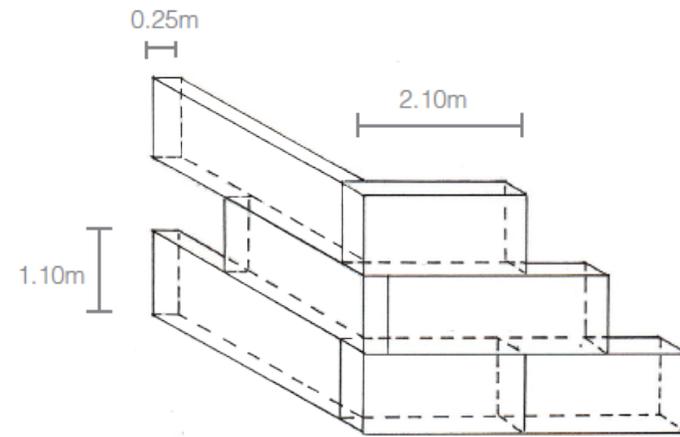
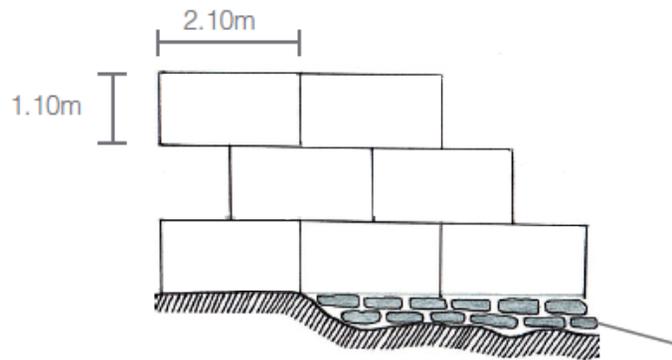


Fig. 82. Esquema del procedimiento constructivo. (Fuente: Acervo del LABPySCT, elaboró: Diego Andrés García Ruiz)

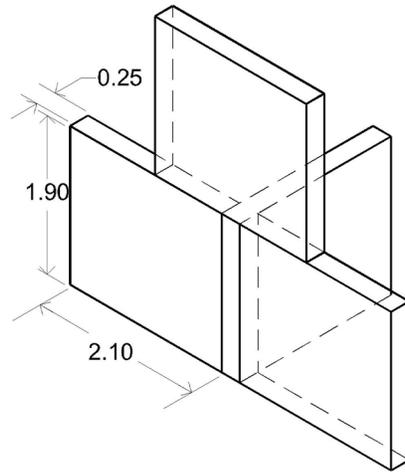
Al igual que las tapias de tierra, es necesario contrapear los módulos para asegurar el correcto funcionamiento estructural de las piezas, y con especial cuidado en las esquinas.



Figs. 83 y 84. En estas imágenes puede observarse el correcto contrapeo de las tapias, con piezas alternadas a la mitad, con el fin de evitar que la junta constructiva sea continua, para dar mayor rigidez al muro, como en cualquier tipo de mampostería. (Fotografías: acervo del LABPySCT)



Figs. 85 y 86. En estas imágenes puede observarse el correcto contrapeo de las tapias, en las esquinas, alternando el remate de la esquina entre cada hilada. (Fotografías: acervo del LABPySCT)



Figs.87 y 88. En estas imágenes se muestra el correcto cuatrapeo o contrapeo de las tapias en un muro intermedio, intersectando las piezas también contrapeadas. (Fotografías: acervo del LABPySCT)

## Variantes de la mezcla de materiales

En el trabajo de campo llevado a cabo en la zona, se encontraron cuatro variantes de la mezcla empleada para estas tapias. La primera, como ya se mencionó, incluye material volcánico (piedra pómez y cacahuatillo o tepojal), residuos de cal, y barro renegrido en proporciones uno a uno de los materiales volcánicos y la cal, y un tercio de volumen de barro (mezcla T-1). En la segunda variante se sustituye la piedra pómez por tezontle en las mismas proporciones (mezcla T-2). En la tercera se omite la tierra conservando igualmente las proporciones uno a uno de los materiales volcánicos y del residuo de cal (mezcla T-3); y en una cuarta variante, localizada en El Fuerte de la Unión, y que tampoco lleva tierra, los residuos de material calizo son sustituidos por hidróxido de calcio comercial, proveniente de la calera de Tepeyahualco, y arena, en una proporción aproximada de 5% de cal aérea y 30% de arena, respecto al volumen total de la mezcla (mezcla F-1). Las dosificaciones se resumen en la tabla 1.

En todas las variantes, la mezcla se hace en seco con los materiales descritos, y se le agrega paulatinamente agua, tal como se ha descrito en párrafos anteriores.

La composición de la mezcla de materiales ofrece una reacción química durante el proceso de fraguado de la mezcla, que tiene ventajas frente al tapial de tierra, su predecesor, que permite reducir el espesor de los muros en un 50%. Esto se explica porque la mezcla de residuos de cal tiene todavía partículas de hidróxido de calcio que endurecen en contacto con el aire.

Además de esta reacción aérea, es posible suponer que el hidróxido de calcio puede desarrollar reacciones

puzolánicas al entrar en contacto con los componentes volcánicos, como se detalla en los siguientes capítulos de esta investigación. El estudio de este fenómeno dio origen al cemento, el aglomerante más socorrido en la construcción contemporánea. Esta mezcla da una resistencia similar al concreto romano, nombrado así en honor a sus inventores. Efectivamente, esta mezcla se trata de un concreto pobre, con bajas resistencias, pero sin gran parte de las desventajas contaminantes de la producción y desecho del concreto convencional.

Por otro lado, este sistema en primera instancia comprueba una reducción del mantenimiento con respecto a las tapias de tierra cruda, y también un incremento de la vida útil de las construcciones. Así, el sistema constructivo de tapias de piedra pómez y cal, optimiza procedimientos

y materiales respecto a los sistemas constructivos que le han dado origen, ya que ofrece una mayor rapidez en la ejecución pero conservando la simplicidad constructiva, ofrece ahorros en material, un menor mantenimiento y mayores periodos de vida útil.

En el siguiente capítulo se presenta un análisis de las características físicas, químicas y mecánicas de los materiales que conforman la tapia, así como de las interrelaciones que ocurren entre ellos en las distintas mezclas, con el fin de profundizar en la comprensión técnica del sistema estudiado.

Tabla 1. Dosificación de las mezclas

Mezcla	Material en volumen						
	Residuo de cal	Cal aérea	Arena	Piedra pómez	Cacahuatillo	Tezontle	Barro renegrido
T-1	1	-	-	1	1	-	1/3
T-2	1	-	-	-	1	1	1/3
T-3	1	-	-	1	1	-	-
F-1	-	1/6	5/6	1	1	-	-

T-1 Tapia de Tepeyahualco 1 (mezcla original)

T-2 Tapia de Tepeyahualco 2

T-3 Tapia de Tepeyahualco 3

F-1 Tapia de El Fuerte

**CAPÍTULO 4.**

**LA TIERRA, LA CAL Y LOS  
MATERIALES VOLCÁNICOS  
COMO ELEMENTOS  
CONSTRUCTIVOS  
SOSTENIBLES**



#### **4. LA TIERRA, LA CAL Y LOS MATERIALES VOLCÁNICOS COMO ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS SOSTENIBLES**

##### **La tierra**

Bajo el término de arquitectura en tierra se engloban las estructuras en las que el suelo natural es acondicionado mediante procedimientos de transformación y secado al sol, para edificar elementos constructivos que hagan posible la habitabilidad de los espacios. (Guerrero, 2007:184). La tierra es el material de construcción más abundante en gran parte del mundo, y desde hace más de 10,000 años se edifica con ella (Pastor, 2017:32).

Sin embargo, es importante considerar la construcción con tierra en su justo valor sin pretender ir más allá de sus posibilidades y rangos de eficiencia. Para ello, es necesario conocer cuáles son sus principios básicos de uso y funcionamiento, los contextos en los que se originó, cuáles son sus ventajas y desventajas y saber cómo trabajan los materiales y los sistemas constructivos que pueden realizarse con tierra. Aunque esta investigación no pretende ser un tratado de construcción con tierra, se exploran algunas nociones básicas para la mejor comprensión del tema de estudio.

Entre las ventajas más relevantes de la construcción con tierra se encuentran las siguientes: en primer lugar, la abundancia de arcillas, y su facilidad de extracción. Esto también le da la ventaja de requerir menos transporte, debido a que la tierra del sitio donde se construye es factible de utilizarse, ya que casi cualquier

tipo de tierra es apta para construir. En segundo lugar, la tierra es un excelente regulador de la humedad ambiental y de la temperatura interiores, ya que actúa como masa térmica. Además, combinada con otros materiales en sistemas constructivos mixtos que contienen mucha fibra, funciona también como aislante (Minke, 2005). En cuanto a los aspectos de sostenibilidad ambiental, la tierra involucra muy poca energía externa para su elaboración: el 1% en comparación con materiales industrializados, y es reutilizable ilimitadamente.

Respecto a los aspectos económicos, es apropiada para la autoconstrucción, ya que su manipulación es muy sencilla, en el ámbito técnico, ofrece la posibilidad de intervención en sus propiedades físico/químicas para mejorar sus cualidades constructivas; puede aprovecharse al máximo el material mediante las técnicas de moldeo, como los adobes y las tapias, debido a que permite la posibilidad de repetición seriada de piezas, así como la modulación, entre otras ventajas.

Sin embargo, como toda materia para construir bajo los estándares actuales, presenta ciertas desventajas, entre las que se encuentran las siguientes:

- No es un material de construcción estandarizado, por ello no existen “recetas” y la mezcla correcta para su aplicación es variable y depende de la composición específica de la tierra de cada lugar.
- Se contrae al secarse por la evaporación del agua utilizada en la mezcla y la presencia de arcillas, y no es impermeable

- Presenta bajas resistencias mecánicas, sin embargo, bien utilizada puede resistir apropiadamente para construcciones de escala menor, a pesar de sus bajos coeficientes.

### Materia prima

El material básico proviene de la excavación del terreno a una profundidad de 50 centímetros a dos metros aproximadamente. Casi cualquier suelo es apto para construir, a excepción de los suelos salinos y los que contienen arcillas expansivas.

Normalmente se consideran tres capas de suelo (fig. 89). La primera es la tierra vegetal de la superficie, una mezcla de materia mineral y orgánica, generalmente más oscura que el resto del suelo, y que está constituida por material vegetal y animal en descomposición, llamado humus. Este suelo orgánico es el que da sustento a todo el reino vegetal; normalmente tiene un espesor de 50 cm aproximadamente, con variaciones dependiendo de la topografía (fig. 90). La segunda capa es la que se utiliza para construir, constituida principalmente por elementos minerales, entre ellos las arcillas (fig. 91). La tercera, constituida por trozos de roca madre y tierra, es un camino intermedio entre la tierra y la capa más profunda de roca madre, y no es adecuada para construir, pues es roca inerte que carece de arcillas, y por lo tanto de la adherencia necesaria que éstas proveen. A esta capa se le denomina también roca en descomposición; ya que el suelo proviene, en efecto, de la disgregación y la alteración de la roca madre de las profundidades del planeta, a través de la acción de los agentes climáticos, químicos y biológicos, a lo largo de miles de años. Así, el suelo es roca descompuesta o disgregada. En este

sentido, la tierra es un material ya alterado, que no puede disgregarse más; a diferencia de casi todos los materiales de construcción que se alteran con el tiempo: los metales se oxidan, la madera se pudre, la piedra y el cemento son atacados químicamente. Correctamente protegida del agua, la durabilidad de la tierra será excepcional. El fuego la refuerza, ya que la tierra cruda se transforma en tierra cocida (Fontaine y Anger, 2009).

### Composición de los suelos

Los suelos están compuestos por arcilla, limo, arena, grava y agua; y sus propiedades y funciones dentro del sistema dependen en gran medida del porcentaje de estos elementos en la tierra (Peña, 2008). Éstos han sido clasificados en función de su tamaño y de sus propiedades:

- Gravas: partículas con un tamaño superior a los 2 mm (normalmente de 2cm a 2mm)
- Arenas: partículas con un tamaño entre 2 mm y 0.06 mm
- Limos: partículas con un tamaño entre 0.06 mm a 0.002 mm
- Arcillas: partículas menores a 0.002 mm

Las gravas, arenas y limos son fragmentos de roca, esféricos, o angulosos, dependiendo de su procedencia. Estos granos no se diferencian más que en su tamaño, y sólo son agregados sin fuerza aglutinante que dan estabilidad y estructura al sistema. Las arenas y las gravas tienen las mismas propiedades mecánicas aunque en grados diferentes. Las arenas son menos estables frente al flujo de agua y menos resistentes a la erosión que las gravas.

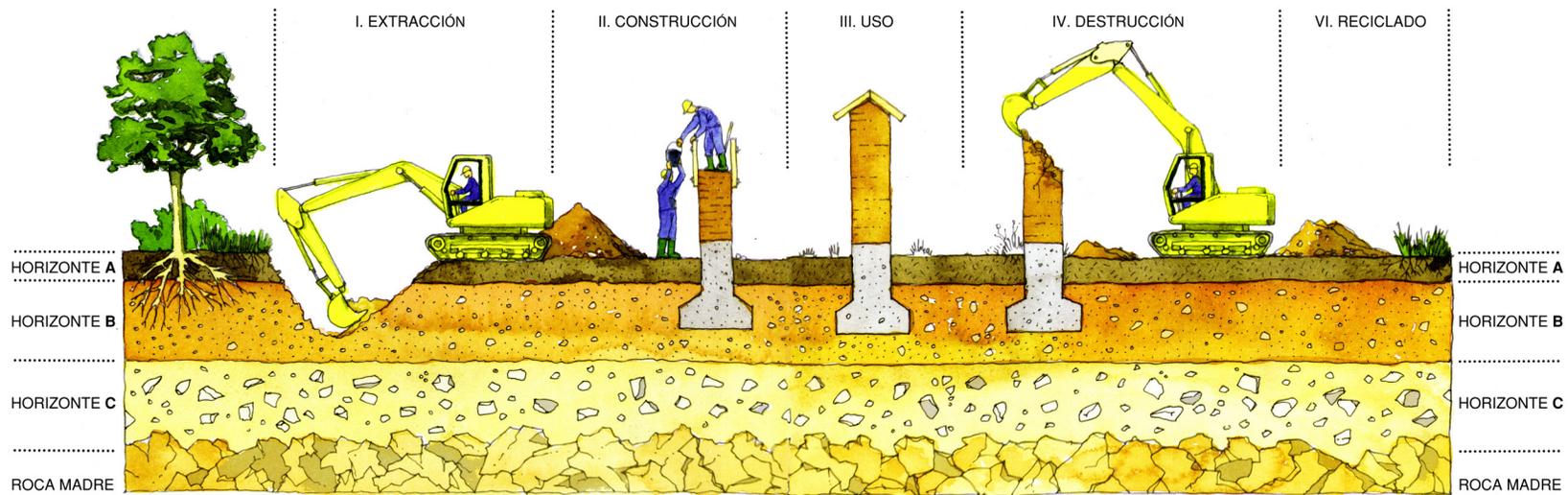


Fig. 89. Capas de suelo. (Fuente: Fontaine y Anger, 2009, pp. 100-101)



Figs. 90 y 91. Capas de tierra. En la imagen 90 puede apreciarse la capa superficial de tierra negra o humus, no apta para construir. En la imagen 91 se muestra la capa arcillosa, materia prima ideal para la construcción con tierra. (Fotografías: Ángeles Vizcarra).

El limo está considerado por algunos autores como Peña (2008:20) como una partícula de grano fino que presenta características de compresibilidad, independientemente de la cantidad de humedad que tenga. Afirma que el limo es inestable por naturaleza, particularmente cuando aumenta la humedad, con tendencia a fluir cuando está saturado. Es relativamente impermeable, difícil de compactar y fácilmente erosionable. Siguiendo al mismo autor, las arenas finas uniformes tienen características similares a un limo: disminuyen su permeabilidad y reducen su estabilidad al aumentar la humedad (Figs 92 y 93).

Las arcillas son totalmente diferentes. Los granos que las componen son tan pequeños que son invisibles a simple vista. Mezcladas con agua, se presentan como una masa de color homogéneo, que hacen pensar en un pegamento. Se da el nombre de coloides (del griego *kolla* "cola, pegamento", y *eidos* "suerte de") a las sustancias que, como las arcillas, tienen un aspecto pegajoso y están constituidas de partículas muy pequeñas, cristales llamados micelas que presentan la cualidad de desplazarse entre el resto de las partículas y establecer relaciones electrostáticas que las ligan en conjunto. Este desplazamiento depende de su contacto con el agua y, a nivel macroscópico, se evidencia en la transformación del suelo en un material plástico, coloidal o hasta líquido que recupera su estado sólido original al secar.

Si se les observa con un microscopio muy potente, puede observarse que la forma de las arcillas es muy distinta a la del resto de los componentes de la tierra. Son granos planos, como hojas o laminillas microscópicas



Figs. 92 y 93. Granulometría de tierras analizadas en el LABPySCT, donde pueden apreciarse las gravas, arenas y limos. (Fotografías: acervo del LABPySCT)

(Fontaine y Anger, 2009) (fig. 94). Este aspecto particular confiere a las arcillas el papel de unir los otros granos: las arcillas son el material aglutinante de la tierra, que crea los puentes de enlace por polaridad entre los componentes del suelo; así como el cemento lo es del concreto. Así, las gravas, arenas y limos constituyen el esqueleto granular de la tierra, y aportan la rigidez al material, mientras que la arcilla contribuye en mayor medida en el comportamiento de resistencia a la compresión, así como en el nivel de agrietamiento de los componentes de tierra de un sistema constructivo (Peña, 2008).

Existe un gran espectro de arcillas, desde las expansivas, que tienen la particularidad de permitir la entrada de mucha agua entre las láminas de su estructura, con lo que manifiestan potentes procesos de hinchamiento que suelen tener efectos nocivos en la construcción al secar, hasta las que son prácticamente inertes y tienen un comportamiento estable al entrar en contacto con el agua. Las propiedades de los suelos están en función de la presencia de arcillas estables, y de las proporciones relativas de sus componentes. Si la tierra es arenosa a pesar de poseer estabilidad ante los cambios de humedad o temperatura, la falta de arcilla la hará frágil y será presa fácil de la erosión. En cambio, una tierra arcillosa tiene una alta cohesión pero cuando se presentan fenómenos de humidificación y secado continuos, sufre cambios volumétricos capaces de generar fuertes agrietamientos en su constitución, y eventualmente, colapsar una estructura (Guerrero, 2007).

Por otro lado, las tierras con gran cantidad de limos generan agrietamientos más severos y unidades más sensibles al desmoronamiento, por lo que podría no ser muy recomendable altas cantidades de limos en el material a utilizar (Peña, 2008:26), por las razones expuestas en párrafos anteriores. Esta aseveración resulta de gran importancia, debido al tipo de tierra utilizado en las tapias en estudio, como se verá en el proceso experimental.

Por último, el agua, fundamental dentro del proceso de preparación de la tierra, cumple dos funciones: transportar a las partículas más pequeñas entre las grandes, y activar las propiedades adhesivas de las arcillas. Éstas, al humedecerse, se expanden ya que



Fig. 94. Partículas de arcilla vistas con el microscopio electrónico. (Fuente: Fontaine y Anger, 2009, p. 151)

el agua se desliza entre las estructuras laminares, recubriéndolas con una fina película de agua. Si ésta se evapora la distancia interlaminares se reduce y las láminas se acomodan paralelamente debido a las fuerzas de atracción eléctricas. Así, la arcilla obtiene una fuerza aglutinante si está en estado plástico y obtiene resistencia a la compresión luego del secado (Minke, 2005:24).

Cada componente juega un papel importante dentro del conjunto y esta importancia varía en función del sistema constructivo utilizado. Para producir un material de construcción de buena calidad, tiene que haber un equilibrio entre el esqueleto granular y los aglutinantes (Fontaine y Anger, 2009).

Diversos estudios sobre la proporción de los agregados y arcillas en diversos sistemas constructivos, han llegado a la conclusión de que la tolerancia o gama de proporciones es muy amplia, por lo que es indispensable hacer pruebas en sitio<sup>8</sup> para poder determinar la calidad de la tierra y en función de su uso específico: adobes, tapias, bajareque.

Aunque no existe un criterio único que relacione las características de la tierra con las técnicas constructivas, sí es posible identificar parámetros generales de aproximación a través de pruebas sencillas de campo y existen algunas clasificaciones que identifican ciertos tipos de tierra con las distintas técnicas constructivas desarrolladas por la humanidad a lo largo y ancho del planeta<sup>9</sup>.

En general las tierras más arenosas se identifican con la construcción de tapias. Las que son más arcillosas, se relacionan con la construcción de mampuestos (adobes y bloques de tierra compactada), así como con las técnicas mixtas de bajareque y pajarcilla. En la figura 95 se muestra de manera sintética una clasificación muy general de los sistemas constructivos de tierra, hecha por Houben y Guillaud (1989).

Por último, cabe señalar que los parámetros de resistencia a la compresión de la tierra oscilan entre 5 y 50 kg/cm<sup>2</sup>. Estos valores dependen de múltiples variables: el tipo de arcilla, la distribución granulométrica de los agregados (limo, arena y gravas), los métodos de preparación de la tierra así como los procedimientos constructivos empleados, como la compactación. Los valores óptimos se alcanzan con una correcta mezcla de la tierra y una adecuada compactación que permita que las partículas de limo y arcilla rellenen todos los espacios intergranulares de la arena y la grava, alcanzando la mayor densidad posible.

Es importante destacar que es posible incrementar la resistencia mediante aditivos o estabilizantes como la cal, pero deben hacerse pruebas de campo pues las resistencias pueden variar significativamente, incluso disminuir en comparación con la mezcla sin aditivos, debido a las reacciones entre estos materiales y los distintos tipos de arcilla. Para mayor detalle a este respecto, consultar el apartado sobre estabilización de suelos en este mismo capítulo.

---

8. Para mayor información respecto a caracterización de tierras y pruebas de campo, consultar Neves (2009)

9. Para mayor detalle sobre la construcción con tierra, sus técnicas y sistemas constructivos, consultar Minke (2005), Fontaine y Anger (2009), Houben y Guillaud (1989), y los demás que aparecen en las referencias y bibliografía de esta tesis

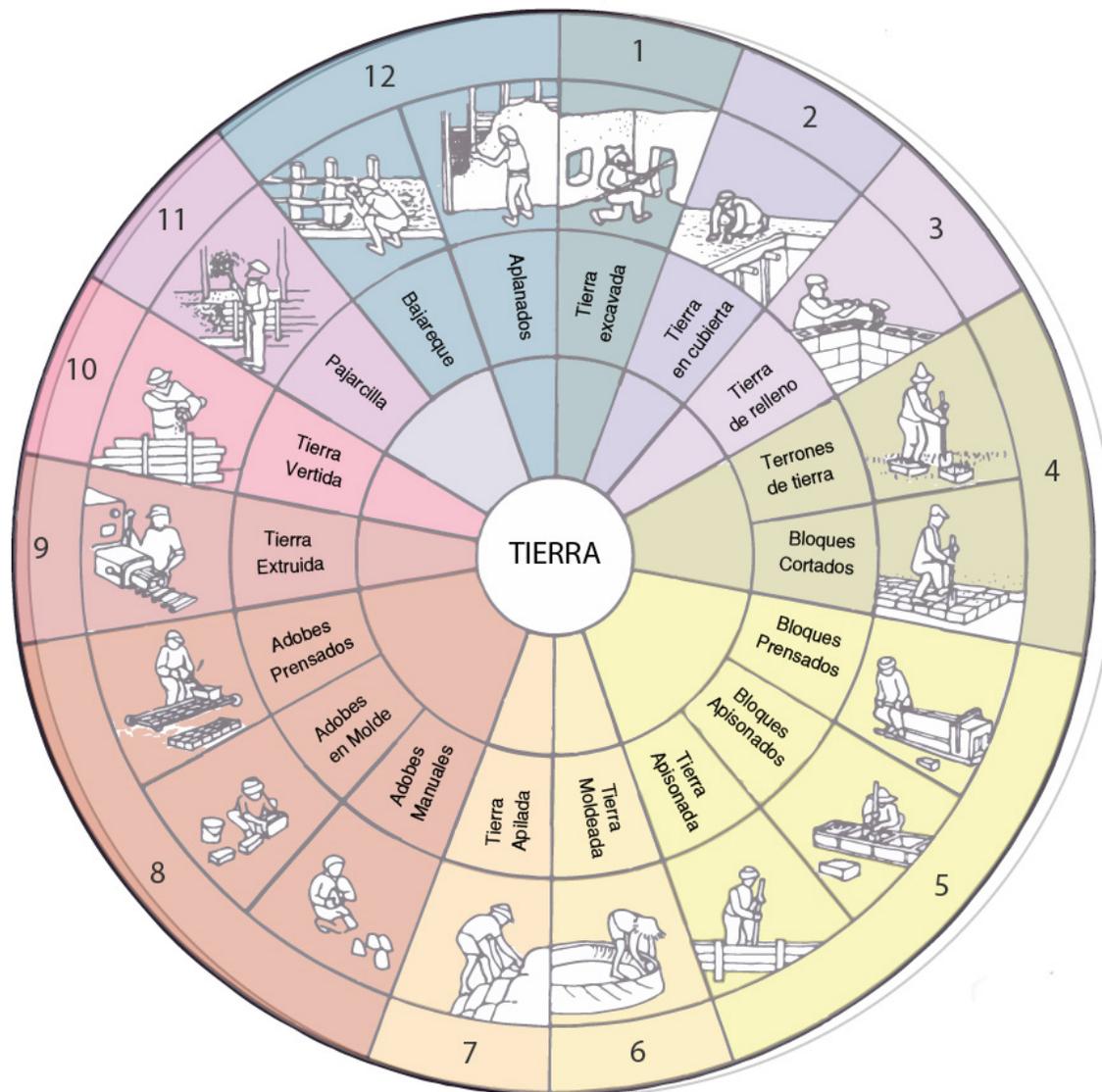


Fig. 95. Este esquema presenta las 12 técnicas más importantes de construcción con tierra. (Fuente: Houben y Guillaud, 1989)

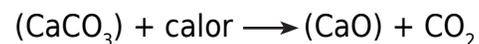
## La cal

La palabra cal proviene del latín *calx* que significa calcio; y se denomina así al óxido de calcio (CaO), material alcalino de color blanco que procede de la calcinación a 900°C de la piedra caliza, que es una roca sedimentaria y porosa formada por carbonatos de calcio (CaCO<sub>3</sub>) principalmente, y que una vez calcinada al entrar en contacto con el agua se transforma en hidróxido de calcio Ca(OH)<sub>2</sub> (Tovar, 2016).

La cal es un material ligante – conglomerante, ya que sufre una reacción química, el fraguado o carbonatación, que entre otras funciones permite unir un material con otro; a diferencia de la arcilla que es un material ligante - aglomerante o aglutinante, es decir, sólo se producen reacciones físicas electromagnéticas para unir los componentes.

### El ciclo de la cal

La cal es un cementante cíclico (Fig.100). Este ciclo se inicia con la **calcinación** de la piedra caliza, compuesta principalmente por carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) a 900°C. Este proceso da como resultado una reacción química que provoca el desprendimiento de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) del carbonato de calcio, lo que origina un compuesto llamado óxido de calcio (CaO), también conocido como cal viva:

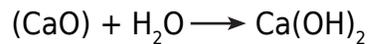


El aspecto de la cal viva es de fragmentos de roca blanquecina irregulares (Fig. 97). Este producto se hidra-



Figs. 96 y 97. Proceso de calcinación de roca caliza y cal viva recién salida del horno en la calera de Tepeyahualco. (Fotografías: acervo del LABPySCT)

ta para que pueda tener propiedades cementantes. Al agregar agua ( $H_2O$ ) estas rocas calcinadas reaccionan exotérmicamente, es decir, generando calor, transformándose ya sea en una pasta blanca o en un polvo seco (figs. 98 y 99), según la cantidad de agua aportada. A menor cantidad de agua durante el proceso (de una tercera parte a la mitad de agua por cada unidad de peso del óxido de calcio), se obtiene polvo, y a mayor cantidad (de  $2\frac{1}{2}$  a 6 partes de agua en peso por una parte de óxido de calcio), una pasta blanca. A este proceso también se le conoce como **hidratación o apagado** de la cal, y da como resultado el hidróxido de calcio [ $Ca(OH)_2$ ], conocido también como cal apagada, si es en pasta, o cal hidratada, si es en polvo:



El hidróxido de calcio resultante del proceso de hidratación, ya sea en polvo o en pasta, puede utilizarse junto con otros agregados (arenas, gravas o pigmentos) como argamasa para unir diversos materiales entre sí, como piedras, ladrillos o tabiques; o como base para morteros, revocos y estucos de recubrimiento para muros, o como estabilizante de suelos y arcillas.

Los agregados funcionan como una estructura para prevenir el encogimiento de la argamasa y le otorgan diversas características dependiendo de sus propiedades, tales como color, textura, dureza, ayuda en la carbonatación y en el posible desarrollo de propiedades hidráulicas. Estas mezclas son llamadas morteros, si la granulometría de los agregados es inferior a 4.75 mm. Si esta medida es superada, ya no se les llama morteros, sino hormigones o concretos (Sámamo, 2018). Así, la mezcla encontrada en Tepeyahualco, es de hecho un con-



Figs. 98 y 99. Cal en pasta y cal hidratada en polvo.  
(Fotografías: acervo del LABPySCT)

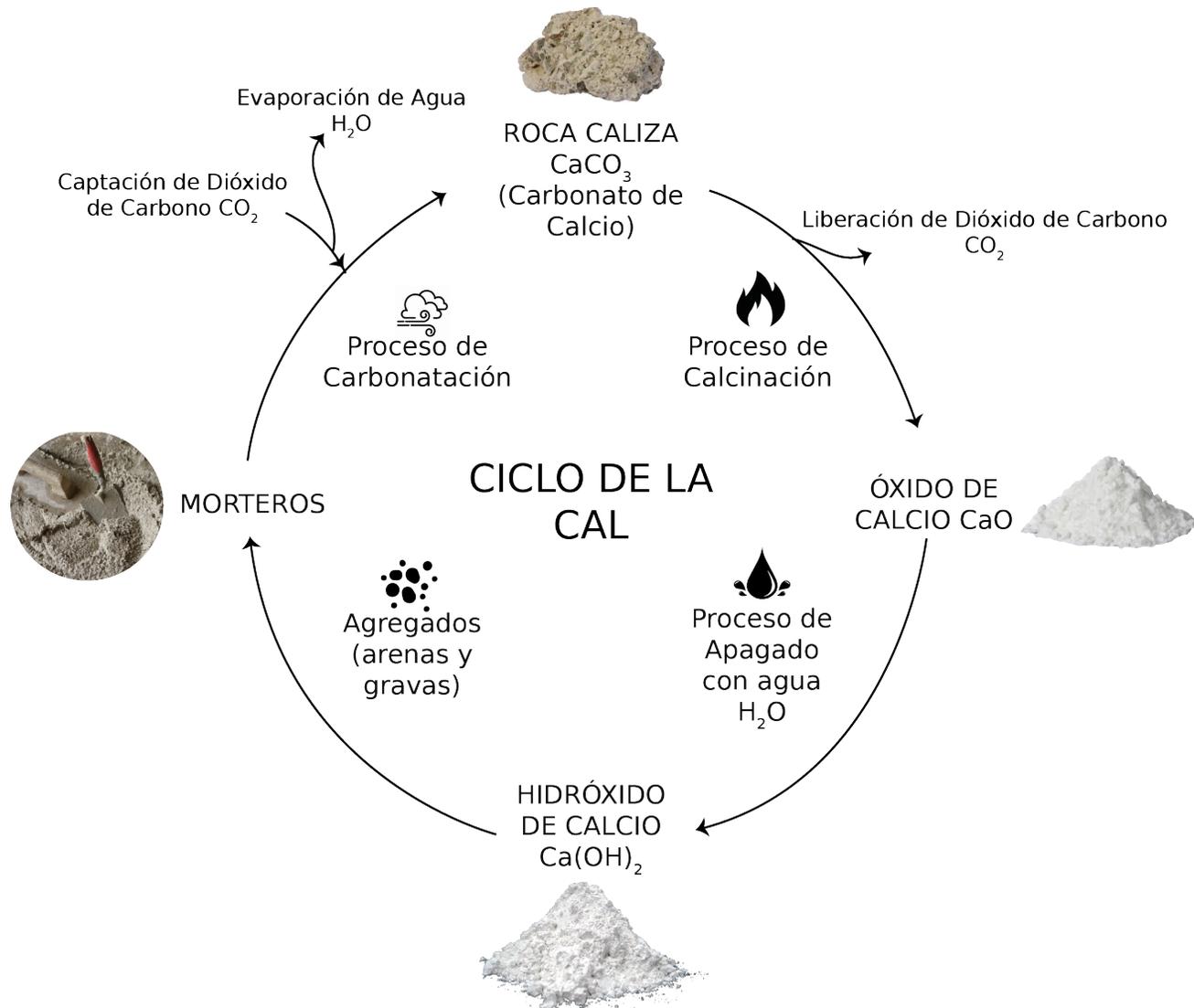
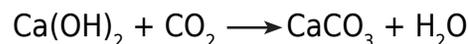


Fig.100 . Esquema que sintetiza el ciclo de la cal. (Fuente: Acervo del LABPySCT elaboró: Karen Aimeé Mendoza)

creto incipiente, como se verá más adelante. Los agregados también cumplen otras funciones tanto en los morteros como en los hormigones o concretos: tienen una influencia directa en la resistencia a la compresión, la porosidad, la permeabilidad y la durabilidad de las mezclas. Al tener una dureza mayor que la cal, aumentan su resistencia a la abrasión, e influyen en la adherencia. Otorgan también un mayor rendimiento en costos pues actúan como relleno del cementante cuyo costo es más elevado (Sámano, 2018).

Finalmente, el hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) presente en el mortero va poco a poco absorbiendo el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) de la atmósfera y liberando agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) desde la superficie hacia dentro, convirtiéndose con el tiempo en una costra pétreo de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), similar a la piedra original, pero con menos impurezas. Esta reacción es lenta, empieza por lo regular 24 horas después de la adición de agua al hidróxido de calcio y termina aproximadamente a los seis meses. Esta condición origina que los elementos tarden en secarse y en adquirir su solidez y resistencia definitiva, lo que hace a la cal un material maleable que permite realizar diversos trabajos durante el secado. A este proceso se le conoce como **carbonatación**:



Según Allison Henry y John Stewart, citados por Sámano (2018), el proceso de carbonatación se da en varias etapas:

En primer lugar, el dióxido de carbono se difunde entre los poros del mortero. En segundo, el dióxido de

carbono se disuelve en el agua presente en los poros del mortero formando ácido carbónico, reduciendo así el pH del agua, en la que el hidróxido de calcio se disuelve. Así, la reacción ocurre entre los iones de carbonato del ácido carbónico y los iones de calcio, formando carbonato de calcio.

Este proceso continúa hasta que todo el hidróxido de calcio ha reaccionado o hasta que el dióxido de carbono ya no es capaz de difundir más y disolverse; esto puede suceder ya sea por una reducción en los niveles de humedad o porque los poros de la superficie están bloqueados por agua excesiva o por el crecimiento de cristales de calcita. Así, la humedad es un factor esencial para la carbonatación. En condiciones con humedad relativa menor del 40% la carbonatación se inhibe y por debajo del 20% la carbonatación es imposible. Por el otro lado, un exceso de humedad impide la carbonatación, ya que la difusión del dióxido de carbono es 10,000 veces más lenta en el agua que en el aire: en una humedad relativa superior a 80% la carbonatación se ve reducida y se detiene al llegar al 100% de saturación de agua en el ambiente. La humedad relativa ideal es del 60% para que el proceso de carbonatación se lleve a cabo (Sámano, 2018:40).

#### Tipos de cal

Como consecuencia de las variaciones de composición química de las rocas calizas de las que procede la cal, pueden obtenerse diversos tipos de este compuesto, que van desde las puras (cales altamente cálcicas) hasta las altamente hidráulicas con contenidos de óxido de calcio del orden de 50% o incluso menos (Tovar, 2016).

En términos generales, según su composición química, las cales se clasifican en cales grasas (calcio como elemento principal), magras (calcio con impurezas como arcillas) y medias (alto contenido de magnesio o dolomita, además del calcio)<sup>10</sup>.

En cuanto al proceso químico de fraguado, las cales se clasifican en cales aéreas y cales hidráulicas. Las más comunes son las cales aéreas, que fraguan en presencia de aire. Están compuestas de óxido e hidróxido de calcio y magnesio provenientes de rocas calizas o dolomíticas y tienen un contenido menor a 10% de material arcilloso. Si la composición de la roca en carbonatos es mayor o igual a 95% se trata de una cal de alta pureza (Tovar, 2016). Estas cales sufren un proceso de fraguado paulatino en presencia del aire, el cual fue descrito en el apartado que explica el proceso de carbonatación.

En las mezclas de las tapias de Tepeyahualco se produce lo que Sámano (2018) ha llamado *cal formulada* (cal cálcica con adiciones puzolánicas) que confieren la propiedad del fraguado y endurecimiento tanto con el agua como por reacción con dióxido de carbono del aire. Este tipo de mezcla y las reacciones que producen son explicadas más adelante.

A continuación se explican cuáles son los materiales puzolánicos, y qué reacciones y efectos producen con la cal aérea.

## Los materiales volcánicos como puzolanas

Las puzolanas son materiales que en sí mismos no poseen propiedades cementantes, pero que reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio al encontrarse finamente divididos y en presencia del agua, a temperatura ambiente. De este modo forman compuestos insolubles y estables con cualidades cohesivas que fraguan con mayor velocidad e incluso lo hacen bajo el agua, es decir, se comportan como conglomerantes hidráulicos que forman silicatos y aluminatos de calcio obteniéndose en algunos casos resistencias notablemente elevadas (Guerrero y Soria, 2014; Sepulcre, 2005).

Uno de los primeros materiales a los que se les encontró tal propiedad, fue una ceniza volcánica empleada desde la época romana en la provincia de Pozzuoli, en Italia, razón por la cual a este tipo de suelos se les designó como puzolanas. Las puzolanas han sido conocidas y usadas desde hace más de 2000 años. El término se generalizó para los suelos y rocas volcánicas con características similares encontrados en otros sitios (Fernández, 1982: 299).

Las puzolanas pueden ser de origen natural o artificial. Las naturales son cenizas y tobas volcánicas cuyo componente principal tiene estructura vítrea, como la roca pumita, pumicita o piedra pómez, las escorias volcánicas y la obsidiana, de origen riolítico, dacítico o

---

10. En este apartado solo se explican los conceptos que serán útiles para el proceso de experimentación de esta tesis. Para profundizar en el estudio de la cal, consultar Tovar (2016) y Sámano (2018).

andesítico; las rocas silíceas sedimentarias, tales como tierras diatomeas, pizarras opalinas y pedernales; y pizarras y arcillas calcinadas de forma natural por lava caliente.

Las de origen artificial son normalmente subproductos industriales como es el caso de las cenizas volantes de altos hornos, polvo de ladrillo, cenizas de cascarilla de arroz o de caña de azúcar (Guerrero, Roux y Soria, 2014).

Para considerar un material como puzolánico, no solo basta una composición mayoritariamente silícea o silicatada, también tienen que darse otras circunstancias como una estructura molecular reactiva, normalmente amorfa, y una alta superficie específica; es decir, una granulometría muy fina. Así, en otras definiciones de los materiales puzolánicos ya se apunta la necesidad de estos factores: "Composición silícea, aluminosa o ferruginosa, cierto estado de cristalinidad y estructura, y capacidad de reacción con la cal a temperatura y presión ambiental en presencia de humedad" (Sepulcre, 2005:41).

Aunque clasificar a las puzolanas es una tarea difícil debido a la gran variedad mineralógica con diversos constituyentes reactivos; es posible, de manera genérica, agruparlas en vidrios volcánicos, tobas volcánicas, calizas silíceas y tierras diatomáceas (Sámano 2018). Por su parte, Sepulcre (2005) las clasifica de la siguiente manera:

- Puzolanas tradicionales:
  - Puzolanas naturales: son depósitos volcánicos cuyo componente principal tiene estructura vítrea como las tobas, cenizas, pumita, escorias y obsidiana; y depósitos minerales silíceos (rocas silíceas de composición opalina, ya sea por precipitación de sílice o por acumulación de sedimentos orgánicos fósiles: tierras diatomeas, ópalo, cherts y lavas con sustanciales contenidos en vidrio y arcillas calcinadas de forma natural por lava caliente.
  - Puzolanas artificiales: las arcillas, el gaize (roca silícea de origen sedimentario de grano fino, porosa, a menudo fósil), los esquistos bituminosos y la bauxita, tras el necesario tratamiento de activación térmica a través de la cocción.
- Puzolanas artificiales de origen orgánico:
  - Cenizas procedentes de la cascarilla de arroz, de la cáscara de los granos de café, de la corteza de coco, del bagazo de caña de azúcar, de la paja de trigo, de la fibra y corteza de las nueces de macadamia, y de la vaina de cacao. Las más investigadas son la cenizas del salvado del arroz, que están compuestas en su mayor parte de sílice activo.
- Puzolanas artificiales de origen inorgánico:
  - Son adiciones de ladrillo y tejas trituradas con distintas granulometrías, a los morteros de cal.

Debido a que las puzolanas que se utilizan en las tapias de Tepeyahualco son de origen volcánico, esta investigación se circunscribe al análisis de estos materiales<sup>11</sup>.

---

11. Para profundizar en el estudio de las distintas puzolanas, consultar Sepulcre (2005).

Las puzolanas que derivan de minerales y rocas volcánicas, se originan durante erupciones volcánicas. Con el enfriamiento rápido del magma, se forman fases vídrias con una estructura desordenada compuesta principalmente de aluminosilicatos. Debido a la presencia de gases, la materia solidificada frecuentemente adquiere una textura porosa y los aluminosilicatos, con una estructura desordenada, no permanecerán estables al exponerlos a una solución de cal (Sámamo, 2018:69).

A este grupo pertenecen las rocas con las que se fabrican las tapias de Tepeyahualco. La pumita, pumicita o piedra pómez, localmente conocida como piedra poma, es una roca ígnea volcánica vítrea, con baja densidad — flota en el agua— y muy porosa, de color blanco o gris. En su formación, la lava proyectada al aire sufre una gran descompresión que produce una desgasificación quedando espacios vacíos separados por delgadas paredes de vidrio volcánico. Es una roca efusiva joven, de terciaria a reciente, que contiene feldespatos potásico (aluminosilicatos), cuarzo y plagioclasa.

En cuanto al tezontle es una roca roja de origen ígneo que se ubica en las laderas de los cerros, volcanes y depresiones. Se produce a partir de piedra pómez, arena y magma. Su aspecto es esponjoso y algunas veces se convierte en una piedra dura. El tezontle tiene componentes a partir del bióxido de hierro, de ahí su color rojizo. Su textura es vesicular, burbujeada y porosa, y entre sus propiedades se encuentra la de guardar el calor, pero no es permeable ni aislante.

Finalmente, el tepojal o cacahuatillo tiene una composición química parecida a la pumita pero por efectos ambientales presenta una estructura cristalina discontinua con mayor porosidad y presencia de arcillas. Es la más ligera de las tres rocas utilizadas en la mezcla.

El volcán del que proceden estos materiales está en la zona de Los Humeros, al nororiente de estado de Puebla y a unos 18 km de Tepeyahualco. Es considerado como un volcán activo, cuya última erupción fue hace aproximadamente 40,000 años. El área forma la caldera de un súper volcán, que tiene un diámetro de 21 km por 15 km. En el borde sur surgen flujos de lava petrificados, que dejaron depósitos volcánicos enormes (fig. 101) de donde provienen las canteras de Tepeyahualco. Dentro de la caldera principal hay calderas menores que han sido aprovechadas como fuente de energía geotérmica para generar electricidad. Este tipo de volcán produce erupciones gigantescas aunque menos frecuentes, cada cientos de miles de años, que las producidas por un estratovolcán como el Popocatepetl. Estas erupciones conformaron el paisaje de la zona, conocido como malpaís, ya descrito en el segundo capítulo.

Los análisis químicos de las puzolanas volcánicas manifiestan que estos materiales presentan un fuerte carácter ácido, con predominio de la sílice y la alúmina e incluso, el óxido de hierro (como el tezontle), cuya suma ponderal suele ser superior al 70%. De ellos, predomina el sílice que, en casos excepcionales, puede suponer cerca del 90% del producto. En el caso de los vidrios y tobas volcánicas, estos óxidos mantienen uniones inestables o débiles con el material de origen. En cuanto al papel que juegan los componentes menores, poco se sabe hasta ahora, aunque los álcalis tienen cierta importancia por sus relaciones de solubilidad con la cal (Soria, 1983).

La composición química de las rocas que conforman estas tapias, tiene distintas implicaciones en sus resistencias, tanto a la compresión como ante los agentes atmosféricos del lugar, que serán analizadas en la fase experimental de la investigación, en el siguiente capítulo.

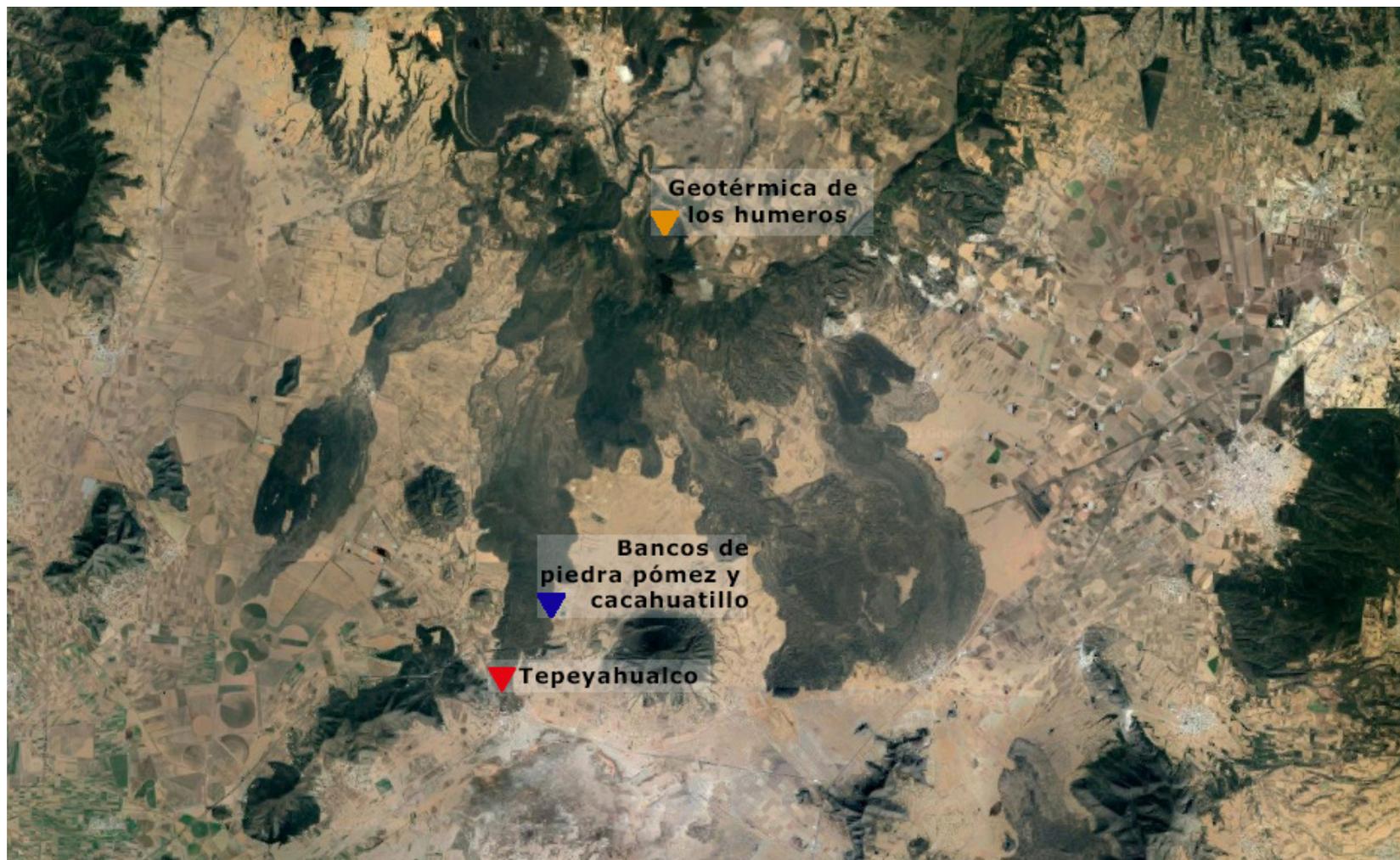


Fig.101. Ubicación de los Humeros y las canteras de material puzolánico en Tepeyahualco (Imagen: acervo del LABPySCT, editado por Karen Aimeé Mendoza Raya).

## Reacciones puzolánicas

Como se mencionó líneas arriba, una parte importante de las cualidades, resistencia y durabilidad de las tapias analizadas depende de la reacción natural de endurecimiento que se presenta al transformarse el hidróxido de calcio en carbonato de calcio en las áreas expuestas al aire. En ellas los materiales constructivos dejan salir vapor de agua y las moléculas de hidróxido de calcio capturan dióxido de carbono del aire y se carbonatan, endureciendo y “atrapando” a las arenas y rocas que están a su alrededor. Sin embargo, en las partes internas de los muros, en las que no se tiene acceso al aire y que permanecen húmedas se generan otro tipo de reacciones a las que se conoce como puzolánicas.

De manera general, una reacción puzolánica se define como el conjunto de fenómenos que transforman una mezcla de puzolana, hidróxido de calcio y agua, en un material compacto de aspecto pétreo. Estas reacciones deben producirse a temperatura y presión ordinarias (Soria, 1983).

La propiedad que hizo a la puzolana preciosa en la edad clásica y aún muy útil en la actualidad es la capacidad del material vítreo para reaccionar con la cal y el agua a temperatura ambiente, formando una masa dura. La reacción de fraguado del hidróxido de calcio con algunas puzolanas no requiere la presencia de aire, ya que los elementos no dependen del dióxido de carbono para endurecer, por lo que puede ocurrir en un ambiente muy húmedo, e incluso bajo el agua, o en el centro de una pared gruesa. Morteros como éstos, que reaccionan

con el agua, son llamados hidráulicos, como se explicó en el apartado concerniente a la cal. Tales características permitieron a los griegos y romanos, desde el siglo I a.C., el uso de una técnica de construcción llamada por Vitruvio *opus caementicium*, algo muy similar a la tecnología del hormigón moderno. (Sámano, 2018).

Así, con el fin de conferir propiedades hidráulicas a la cal aérea (hidróxido de calcio), se le agregan puzolanas y con estos ingredientes combinados se conforman mezclas que Sámano (2018) ha llamado de *cal aérea formulada*. Este es el caso de la composición de las tapias de Tepeyahualco, y a continuación se da una breve explicación de estas reacciones químicas.

Es universalmente aceptado que la principal reacción cementicia está propiciada por la disolución de sílice vítreo/amorfo, produciendo sílice en disolución, que reacciona con el hidróxido de calcio para formar gel de silicato cálcico hidratado (CSH). La alúmina también se disuelve en el medio con alto pH. Una pequeña cantidad se incorpora al gel CSH, pero la mayoría reacciona para formar fases de aluminato cálcico hidratado (CAH) y silicato/aluminato cálcico hidratado (CASH), normalmente cristalinas, las cuales pueden contribuir al proceso de cementación y a su resistencia. El grado de solubilidad dependerá de la superficie específica, que es el factor principal dentro de los diferentes procesos originados por las distintas puzolanas, respecto al tiempo necesario para incrementar la resistencia en el hormigón (Sepulcre, 2005).

Por su parte, Rabilero, citado por Sepulcre (2005)

afirma que las reacciones puzolánicas transcurren de acuerdo con las leyes cinéticas de las reacciones heterogéneas en estado sólido, con presencia de fenómenos difusivos, y marcada influencia de la temperatura y la granulometría de las puzolanas. Por ello, la velocidad de reacción de cualquier puzolana con el hidróxido de calcio en presencia de agua, será tanto mayor cuanto menores sean las dimensiones de las partículas de aquella. Siguiendo al mismo autor, es realmente la presencia de álcalis lo que le otorga las propiedades cementicias a la puzolana.

Así, según Soria (1983), es factible concluir que todos los compuestos (vítreos, amorfos, minerales cristalizados alterados o en fase de descomposición), participan en mayor o menor grado de la actividad puzolánica. Por esta razón es difícil cuantificar el fenómeno, ya que cada puzolana es un caso particular y no es posible aún establecer una teoría general de la actividad puzolánica.

Por estas razones, “la evidencia definitiva de la actividad puzolánica de un material es su resistencia, combinada con su durabilidad”. Se han dado casos de puzolanas que no pasan con éxito las pruebas químicas de puzolanidad, pero a pesar de eso tienen una buena actividad puzolánica, determinada por sus resistencias mecánicas”. (Sepulcre, 2005:68).

### **La tierra y la cal: Estabilización de suelos**

Finalmente, para comprender de mejor manera la interacción de los materiales de las tapias en estudio, se analiza la combinación de tierra y cal, así como sus efectos.

Los métodos que modifican la respuesta constructiva de la tierra agregando componentes adicionales que subsanan su vulnerabilidad, son llamados procesos de estabilización. Estas técnicas también mejoran la capacidad de suelos que ya son adecuados. Ayudan a hacer más estable su comportamiento en cuanto a forma y resistencia, y ante los distintos agentes ambientales. Existen diferentes procedimientos para estabilizar los suelos. Según la clasificación sugerida por Guerrero (2007), éstos se dividen en procesos homogéneos y heterogéneos.

Los primeros consisten en la modificación de las proporciones relativas de la granulometría natural del suelo a través del agregado de los componentes deficitarios. Existen dos casos concretos. En el primero, la tierra inerte presenta falta de cohesión y desmoronamiento, en cuyo caso es necesario agregarle arcilla; y en el segundo, el suelo es en exceso inestable, y presenta fisuras durante el secado. Para lograr un equilibrio se añade arena.

En los procesos heterogéneos se agregan al suelo componentes ajenos a su condición natural, los cuales ayudan a conferir propiedades estables, sobre todo ante la presencia del agua. Éstos a su vez se dividen en tres grupos: por consolidación, fricción e impermeabilización.

Los estabilizantes por consolidación, que es el caso que se analiza en esta investigación, ayudan a las arcillas en la acción aglutinante, formando cadenas con limos y arenas. Los materiales utilizados pueden ser cal, cemento, polímeros extraídos de cactáceas como la baba de nopal, y proteínas animales como caseína, sangre o huevo. En estos casos, las reacciones producidas en el elemento constructivo dejan de ser solo físicas, ya que se

involucran procesos químicos de reacción en ocasiones irreversibles. Los procesos de estabilización por fricción (adición de fibras) y por impermeabilización (capas protectoras contra el agua), sólo involucran transformaciones físicas<sup>12</sup>.

El hidróxido de calcio se utiliza para estabilizar tierras muy arcillosas, evitando así procesos severos de contracción y retracción que pueden dañar las estructuras. En ocasiones puede también incrementar la resistencia de la tierra, pero no siempre es así. Este hecho depende tanto del tipo de arcillas, como de la cantidad de hidróxido de calcio agregado.

Los suelos o tierras aptas para estabilizar con hidróxido de calcio son aquellas que tienen un índice de plasticidad superior a 10. Si el suelo no posee esta característica, no es candidato a la estabilización con este material, ya que las reacciones entre arcillas y el hidróxido de calcio no se darán (Tovar, 2016). También deberán estar exentos de material vegetal, con contenidos mínimos de sulfatos (<0.8%), ya que éstos pueden provocar reacciones químicas que producen cambios volumétricos; y con una cantidad de finos superior a 5% de la composición granulométrica de la tierra.

El proceso de estabilización de arcillas con cal funciona de la siguiente manera: el principio químico se da considerando que se ha agregado al suelo la cantidad

suficiente de cal para mantener el pH mayor o igual a 12.4, determinado mediante la prueba de Eades&Grim<sup>13</sup>. Como el sílice y aluminio de las arcillas son solubles y reaccionan con los cationes de calcio, forman compuestos conglomerantes, alumino- silicatos de calcio hidratados, reacciones similares a las puzolánicas, que aumentan considerablemente la resistencia del suelo y mejoran otras propiedades geotécnicas. Esta reacción continúa a largo plazo, incrementando permanentemente la resistencia y estabilidad del suelo.

La capa estabilizada crea una barrera resistente al agua, la cual impide su paso por gravedad y mitiga la humedad por capilaridad, ya que los iones de calcio desplazan a los iones de sodio, potasio y magnesio de la superficie de las partículas arcillosas, reduciendo al máximo la cantidad de agua presente.

Después de haber sido mejorado, el suelo se hace desmenuzable y granular, siendo más fácil de trabajar y compactar. El índice de plasticidad del suelo disminuye drásticamente al igual que su tendencia a hincharse y contraerse, ya que las partículas de arcilla drenan inmediatamente el agua, permitiendo la compactación del suelo e incrementando su capacidad de carga. En este punto, las partículas finas de arcilla se aglomeran en elementos más gruesos y friables, perdiendo su carácter pegajoso y tomando un aspecto arenoso. Los suelos tratados con hidróxido de calcio también presentan mejo-

---

12. Para mayor detalle respecto a estos procesos, consultar Guerrero (2007). En este apartado únicamente se estudia el proceso de estabilización de las tierras con hidróxido de calcio.

13. Para mayor detalle sobre esta prueba, consultar la norma ASTM D – 6276 (2019)

ras en la resistencia a la deformación y en su módulo de elasticidad (Tovar, 2016).

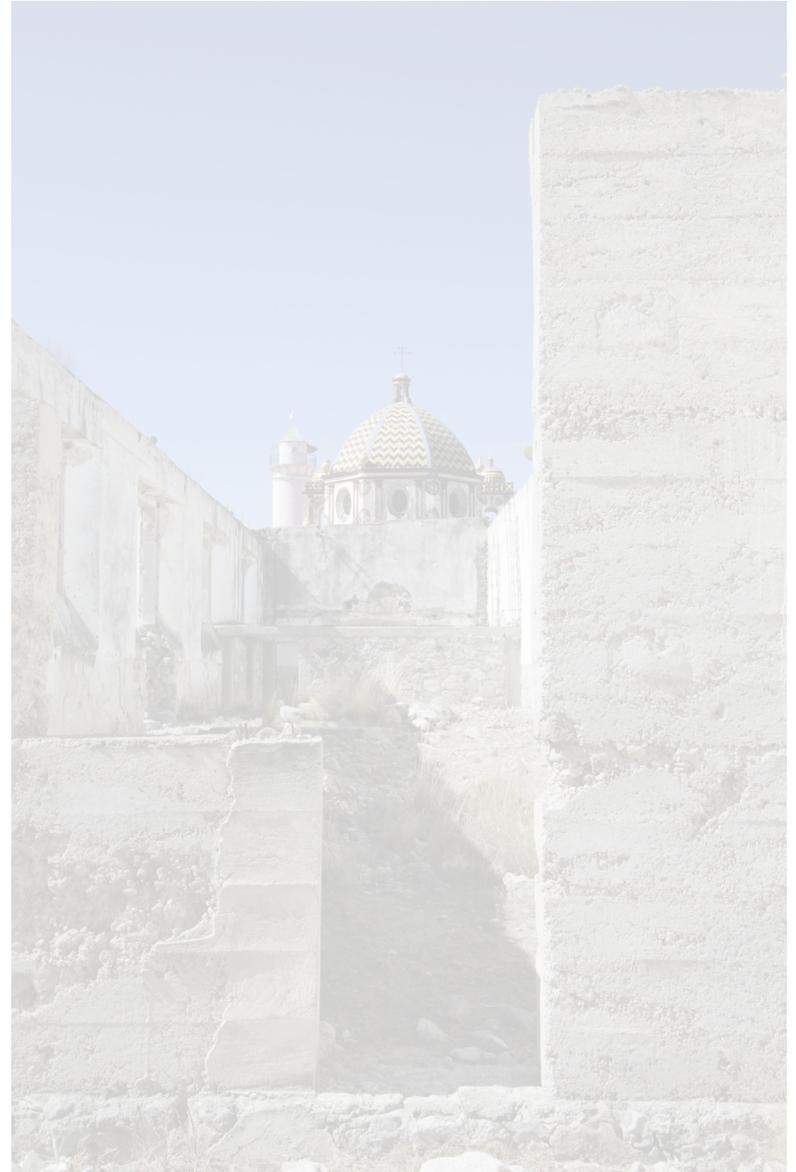
En este capítulo se han revisado las características básicas de los materiales que intervienen en la manufactura de las tapias de Tepeyahualco, así como las interacciones físico-químicas entre ellos. Es importante mencionar la sostenibilidad de los materiales empleados en estas tapias, como se ha dado cuenta de ello a lo largo de las explicaciones ofrecidas en este capítulo, sobre todo, en comparación con el cemento, uno de los materiales más socorridos y que está sustituyendo a este tipo de construcción, que finalmente, no ofrece mayores ventajas que las que ya tienen estas tapias, pero sí incrementa costos tanto en términos económicos como ambientales.

Como se explicó en este capítulo, la tierra es un material inocuo, totalmente reutilizable y reciclable ya sea para construir nuevamente, o para ser reincorporado a los ciclos de la naturaleza. Por su parte, la cal es un material que en ninguna de sus aplicaciones genera compuestos secundarios no deseados o residuos que requieran algún tratamiento especial al final de su vida útil, ya que puede ser fácilmente reincorporado al ambiente, ya sea como carbonato de calcio o fuente de calcio para mejora de suelos cultivables. Por otro lado, la reacción de carbonatación del hidróxido de calcio absorbe el equivalente al 50% del dióxido de carbono que emite a la atmósfera al ser calcinado en su preparación, además de requerir temperaturas de calcinación menores (900°C), en comparación con el cemento (1500°C).

Finalmente, las rocas volcánicas son materiales que existen en abundancia en la región, y no necesitan ningún proceso de preparación para ser utilizadas, ni tampoco requieren ser transportadas grandes distancias.

En el siguiente capítulo se describe el proceso de experimentación al cual fueron sometidas las mezclas de Tepeyahualco, y se ofrece una discusión de los resultados con el fin de hacer una reflexión sobre los procesos empíricos que llevaron al uso y aprovechamiento de este sistema constructivo.

**CAPÍTULO 5.**  
**PROCESO EXPERIMENTAL**



## 5. PROCESO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe el proceso que se llevó a cabo para estudiar con detalle el sistema constructivo de las tapias de roca volcánica, residuos de cal y tierra, a partir de las inferencias de los estudios de campo, las entrevistas a maestros constructores y la comprensión de las interacciones mecánicas y físico-químicas de los materiales que componen el sistema constructivo, expuestas en los capítulos anteriores.

Estos trabajos fueron desarrollados en el Laboratorio de Procedimientos y Sistemas Constructivos Tradicionales como alternativa para una arquitectura sustentable de la Facultad de Arquitectura de la UNAM, el Laboratorio de Materiales de la Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, y los Laboratorios para la Enseñanza e Investigación de la Edificación Sostenible de la Facultad de Arquitectura de la UNAM.

### Metodología

Para cumplir con los objetivos de este trabajo de investigación, respecto a la identificación de posibles aportaciones de este sistema constructivo en el campo de la sostenibilidad en términos técnicos, así como evaluar la resistencia a la compresión de las mezclas de la tapia estudiada y verificar la presencia de reacciones puzolánicas en el fraguado de las mezclas; se aplicó el siguiente método de análisis empírico-experimental:

En primer lugar, se realizaron modelos a escala (1:5) que reprodujeron la tapia de manera fidedigna con la

intención de identificar las principales variables asociadas al sistema constructivo. Se utilizaron en la medida de lo posible materiales y procedimientos iguales a los empleados en la realidad. Mediante esta reproducción, se pudo comprender de manera cabal la manufactura de las tapias respecto a tiempos de ejecución, uso de herramientas, procedimientos de transformación y preparación de materiales (Figs. 102 a 105).

En segundo lugar, se caracterizaron los materiales que componen las mezclas con el fin de comprender su función dentro del sistema: para determinar y evaluar las características de la tierra utilizada en estas tapias, se definieron los límites líquido, plástico y de contracción mediante la prueba de los límites de Atterberg, para conocer el tipo exacto de tierra del sistema en estudio según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), establecido en la norma ASTM D2487-11 (2011).

Por otro lado, para caracterizar y evaluar los materiales de la tapia de piedra pómez y cal, se utilizaron como referencia las normas NMX-C-508-ONNCCE-2015 (Bloques de tierra comprimida estabilizados con cal. Especificaciones y métodos de ensayo), NMX-C-513-ONNCCE-2015 (Cal viva. Especificaciones y métodos de ensayo) y NMX-C-003-ONNCCE-2015 (Cal hidratada. Especificaciones y métodos de ensayo). Una vez analizadas las distintas combinaciones de materiales de las mezclas recopiladas en campo se hicieron modificaciones en la dosificación y combinación de los componentes con el fin de comprender su comportamiento estructural y optimizar los procedimientos de construcción.

Para la realización de las pruebas de compresión simple se usó como referencia tanto la norma mexicana NMX-C-036-ONNCCE-2013 (resistencia a la compresión de mampuestos), como la ASTM C39-2018 (método estándar de prueba de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto), realizando una adecuación debido a que las probetas realizadas fueron cúbicas.

Ya que se infiere que el hidróxido de calcio desarrolla por un lado reacciones puzolánicas y por otro, endurecimiento por carbonatación, y ambos tienen diferentes velocidades de reacción (Guerrero, Roux, Soria, 2014), se decidió realizar juegos de seis probetas por mezcla con periodos largos de fraguado. Se establecieron tres distintas etapas: uno, tres y seis meses (30, 90 y 180 días) con el fin de verificar los supuestos antes mencionados.

Después de estos periodos en los que las probetas se mantuvieron en áreas con temperatura y humedad controladas, fueron sometidas a los ensayos de compresión en dos fases, la primera desarrollada en el laboratorio de materiales de la UAM-Xochimilco y la segunda en los Laboratorios de Enseñanza e investigación de la edificación sustentable, en la Facultad de Arquitectura de la UNAM.

Por otro lado, se decidió realizar a las tapias pruebas de absorción capilar y pruebas de inmersión total en agua mediante probetas de ensayo de algunas mezclas originales y las modificadas, con el fin de corroborar las reacciones puzolánicas en las tapias. Las



Figs. 102 y 103 Reproducción de la tapia en laboratorio escala 1:5. Armado del encofrado, preparación de la mezcla y apisonado. (Fotografías: acervo del LABPySCT)

pruebas se llevaron a cabo con base en la Norma italiana para la absorción capilar Normal 11/85 (Assorbimento d'acqua per capillarità); y la norma mexicana NMX-C-037-ONNCCE-2013, (Determinación de la absorción total y la absorción inicial de agua en bloques, tabiques o ladrillos y tabicones – Método de ensayo).

Se hicieron dos tipos de pruebas para determinar la absorción capilar de las mezclas; la primera con un tiempo de inmersión de 10 a 60 minutos con una inmersión parcial de 5mm, y la inmersión total de las probetas durante 24 horas. Las probetas se secaron totalmente antes de iniciar las pruebas. Para finalizar con estos ensayos, se tomaron tres muestras representativas de las tapias de Tepeyahualco una vez sometidas a las pruebas de inmersión total, después de seis meses y ya totalmente secas, a pruebas de compresión para verificar si ésta se veía afectada por la humedad.

Para todos los ensayos se elaboraron probetas de 5x5x5 cm de cada una de las mezclas, elaborando seis especímenes por cada argamasa, según lo dictan las normas citadas anteriormente.

#### Elección y caracterización de materiales

Todos los elementos de las pruebas de ensayo se hicieron con materiales obtenidos en la región en los mismos bancos de donde se extraen los recursos para construir las tapias de Tepeyahualco.

En primer lugar se determinó la composición de la mezcla de residuos de cal, se hicieron varias tomas del material y mediante métodos empíricos se determinó en



Fig. 104



Fig. 105

Figs. 104 y 105 Reproducción de la tapia en laboratorio escala 1:5. Desmolde. (Fotografías: acervo del LABPySCT)

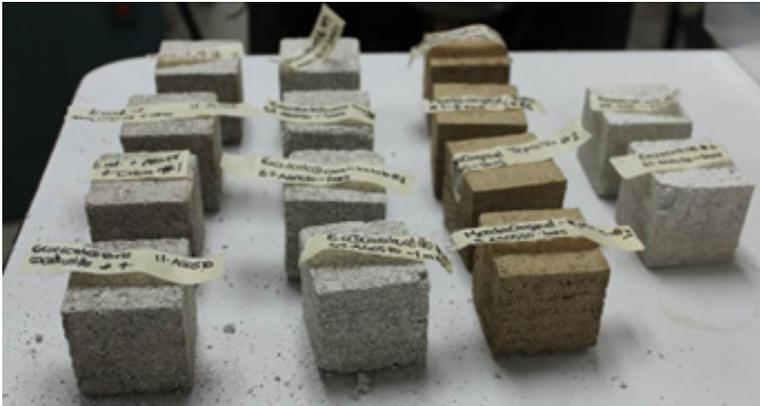


Fig. 106. Probetas de ensayo de las distintas mezclas (Fotografía: acervo del LABPySCT)



Figs. 107 y 108. Prueba de sedimentación del excedente de cal para determinar la cantidad de hidróxido de calcio y arenas de roca caliza que no alcanzó a calcinarse. En la imagen 119 se aprecia el material residual en seco, y en la siguiente, al agregarle agua se aprecia en la parte superior de la botella la cantidad de hidróxido de calcio y en la inferior, las arenas de la roca caliza que no alcanzó a calcinarse. (Fotografías: acervo del LABPySCT)

un promedio de seis muestras, que el residuo de cal contiene un 15% de material activo (cal viva e hidróxido de calcio), y un 85% de áridos, esto es, la piedra caliza que no alcanzó a calcinarse y convertirse en óxido de calcio, cumple las funciones de un agregado más en la mezcla, el de las arenas. Aunque no es posible tomar estos datos como un indicador fijo, es factible considerarlos como una cifra promedio, pues a pesar de que la composición de la mezcla residual varía dependiendo de la fecha de fabricación y desecho, los resultados de las pruebas se mantuvieron constantes con mínimas variaciones dentro de rangos aceptables (Figs 107 y 108).

En segundo lugar, para caracterizar y evaluar la tierra utilizada en la localidad, llamada *barro renegrido* por su color oscuro, se determinaron los límites líquido, plástico y de contracción, como se explicó en la metodología. Con estos datos y con el análisis granulométrico efectuado en laboratorio, según el SUCS el suelo es de tipo “ML”, es decir, “limos arcillo-arenosos de baja plasticidad” (ver tabla 2).

Tabla 2. Límites de Atterberg. Muestra: barro renegrido. Localidad: Tepeyahualco, Puebla

Granulometría (%)			Límite líquido	Límite plástico	SUCS	Clasificación
Grava	Arena	Finos				
-	29	71	42.50	29.90	ML	Limo arcillo-arenoso de baja plasticidad

Para iniciar las primeras aproximaciones a las pruebas de compresión, se partió de las cuatro mezclas con las proporciones recabadas en campo, descritas en el tercer capítulo de este trabajo: tres de la tapia de Tepeyahualco (T-1, T-2 y T-3) y una de la tapia de El Fuerte (F-1).

Con esta base, y con el fin de caracterizar y entender cuál es la función en específico de la tierra, se hizo una variante experimental con la mezcla de El Fuerte (F-1a), en la que se introdujo la tierra en las mismas proporciones que la mezcla original de Tepeyahualco, que funcionó como muestra “testigo”, ya que se infería en un inicio que la tierra no tenía ninguna función importante dentro del sistema, debido a la alta presencia de limos y la escasa cantidad relativa de arcillas y su bajo índice de plasticidad. A continuación se enlistan las dosificaciones de las mezclas de Tepeyahualco, del Fuerte, y la mezcla testigo:

Tabla 3. Dosificación de las mezclas recabadas en campo

Mezcla	Material en volumen						
	Residuo de cal	Cal aérea	Arena	Piedra pómez	Cacahuatillo	Tezontle	Barro re-negrido
T-1	1	-	-	1	1	-	1/3
T-2	1	-	-	-	1	1	1/3
T-3	1	-	-	1	1	-	-
F-1	-	1/6	5/6	1	1	-	-
F-1a	-	1/6	5/6	1	1	-	1/3

T-1 Tapia de Tepeyahualco 1  
 T-2 Tapia de Tepeyahualco 2  
 T-3 Tapia de Tepeyahualco 3  
 F-1 Tapia de El Fuerte  
 F-1a Mezcla testigo

En todas las variantes, la mezcla se hizo en seco con los materiales descritos, y se le agregó paulatinamente agua hasta lograr una consistencia húmeda, tal como se describió la elaboración de la mezcla en campo en el tercer capítulo de este documento.



Fig. 109. Mezcla de materiales en seco (Fotografía: acervo del LABPySCT)



Fig. 110. Mezcla húmeda de materiales. (Fotografías: acervo del LABPySCT)

En una segunda fase, con el fin de profundizar en la función y caracterización de cada uno de los materiales de las mezclas, éstos fueron estudiados por separado bajo las mismas pruebas (resistencia a la compresión simple y absorción capilar) y en una serie de combinaciones que se detallan a continuación:

Tabla 4. Dosificación y combinación de mezclas experimentales

Mezcla	Material en volumen				
	Residuo de cal	Piedra pómez	Cacahuatillo	Tezontle	Barro renegrido
E-1	-	-	-	-	1
E-2	1	-	-	-	-
E-3	1	1	-	-	-
E-4	1	-	1	-	-
E-5	1	1	-	1	-
E-6	1	-	1	1	-
E-7	1	-	-	1	1/3
E-8	1	1	-	-	1/3
E-9	1	-	1	-	1/3

E-1 *Barro renegrido*

E-2 Residuo de cal

E-3 Residuo de cal con piedra pómez

E-4 Residuo con *cacahuatillo*

E-5 Residuo de cal con tezontle

E-6 Residuo con *cacahuatillo* y tezontle

E-7 Residuo de cal con *barro renegrido* y tezontle

E-8 Residuo de cal con *barro renegrido* y piedra pómez

E-9 Residuo de cal con *barro renegrido* y *cacahuatillo*

Sólo los materiales aglutinantes y cementante, es decir, la tierra y el residuo de cal, fueron sometidos a pruebas por separado. Los áridos se combinaron con

el cementante y el aglutinante en distintas mezclas, ya que por sí solos no poseen propiedades cohesivas. Las dosificaciones se mantuvieron en las mismas proporciones de las mezclas originales (ver tabla 4).



Fig. 111 y 112. Procedimiento de apisonado de la mezcla en los moldes de acero maquinado, y muestras semi-secas listas para ser desmoldadas (Fotografías: acervo del LABPySCT)

Las mezclas de tierra y áridos sin el excedente de cal no fueron realizadas ya que no hay reacción puzolánica entre la tierra y las rocas volcánicas, y esta mezcla da como resultado una tapia convencional de tierra, que no es materia de análisis en este estudio.

Cabe señalar que en esta fase de experimentación también se dejan fuera muestras experimentales hechas con cal hidratada y arena, pues el material más utilizado es el residuo de cal, y el que presenta mayores posibilidades de uso ecológico, ya que se aprovecha un material residual que se desecha en grandes cantidades.

En una tercera y última fase, se sustituyó el barro por una tierra con mayor contenido de arcilla, con el fin de tener más elementos de análisis para comprender la peculiar función que tiene el barro en esta técnica. El resto de los materiales se mantuvo, al igual que las dosificaciones de las mezclas originales. Cabe señalar que sólo se hizo la mezcla original sustituyendo la tierra arcillosa por el barro renegrido, y una segunda muestra experimental que contiene residuo de cal, tezontle y tierra, debido a que el tezontle presenta altas resistencias cuando funciona sólo con los conglomerantes y/o aglutinantes. También se probó la tierra aislada para verificar su resistencia y compararla con el barro de Tepeyahualco.

Tabla 5. Límites de Atterberg. Muestra: tierra arcillosa. Localidad: Tepoztlán, Morelos

Granulometría (%)			Límite líquido	Límite plástico	SUCS	Clasificación
Grava	Arena	Finos				
5.74	66.57	27.69	63.60	42.70	SCH	Arena arcillosa de alta plasticidad

En la siguiente tabla se muestran los materiales utilizados y sus dosificaciones para las mezclas con tierra arcillosa:

Tabla 6. Dosificación y combinación de mezclas con tierra arcillosa

Mezcla	Material en volumen				
	Residuo de cal	Piedra pómez	Caca-huatillo	Tezontle	Tierra arcillosa
A-1	-	-	-	-	1
A-2	1	1	1	-	1/3
A-3	1	-	-	1	1/3

A-1 Tierra arcillosa

A-2 Mezcla original sustituyendo el barro por tierra

A-3 Residuo de cal, tezontle y tierra arcillosa

Finalmente, para las pruebas de absorción capilar se probaron las siguientes mezclas:

Tabla 7. Mezclas sometidas a las pruebas de absorción capilar

Mezcla	Composición	Absorción capilar	Absorción total
T-1	Residuo de cal, piedra pómez, <i>cacahuatillo</i> y <i>barro renegrido</i>	x	x
T-2	Residuo de cal, tezontle, <i>cacahuatillo</i> y <i>barro renegrido</i>	x	x
T-3	Residuo de cal, piedra pómez y <i>cacahuatillo</i>	x	x
E-1	<i>Barro renegrido</i>	x	x
E-2	Residuo de cal	x	x
E-3	Residuo de cal con piedra pómez	x	x
E-4	Residuo de cal con <i>cacahuatillo</i>	x	x

E-5	Residuo de cal con tezontle	x	x
E-6	Residuo de cal con <i>cacahuatillo</i> y tezontle	x	x
E-7	Residuo de cal con <i>barro renegrado</i> y tezontle	x	x
E-8	Residuo de cal con <i>barro renegrado</i> y piedra pómez	x	x
A-1	Tierra arcillosa	x	x
A-2	Mezcla original sustituyendo al barro por tierra arcillosa	x	x
A-3	Residuo de cal, tezontle y tierra arcillosa	x	x

### Equipo e instrumental

Para fabricar las probetas, se utilizaron moldes estandarizados de acero maquinado, modelo E 829 de 5x5x5 cm, de tres cavidades, marca ELVEC. Se utilizó un pisón de caucho de ½" x 1"x 6" para compactar la mezcla en los moldes. Estos equipos están regidos por lo dispuesto en las normas ASTM C109, C141, C593 y AASHTO T106 (Figs 111 y 112).

Para las pruebas de compresión se utilizaron los siguientes equipos: en las pruebas hechas en el Laboratorio de Materiales de la Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, se empleó una prensa manual digital ELVEC modelo E657-1 (Fig. 114). En cuanto a las pruebas realizadas en la Facultad de Arquitectura de la UNAM, se utilizó una máquina de compresión marca Instron modelo 400 RD con capacidad de carga de 100 ton, con certificación (fig. 113).

Para las pruebas de absorción capilar, se utilizó una báscula electrónica marca Esnova modelo ES-BP5000, un horno eléctrico marca Black & Decker y equipos caseros para las pruebas de inmersión en agua.



Figura 113. Máquina de compresión marca Instron modelo 400 RD con capacidad de carga de 100 ton (Fotografía: acervo del LABPySCT)

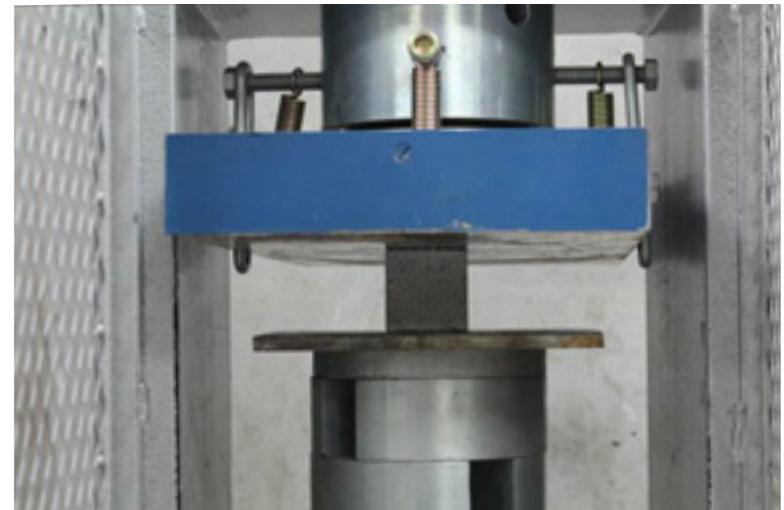


Figura 114. Prensa manual ELVEC con una de las probetas a ensayar (acervo del LABPySCT)

## Resultados

En primer lugar se presentan los resultados de las pruebas de compresión que se obtuvieron en función de las distintas mezclas y los tiempos de fraguado. En la tabla 8 se analizan las mezclas recabadas en campo; en la tabla 9 se presenta el análisis de los materiales por separado; y en la tabla 10 los resultados de las mezclas con la sustitución del barro por tierra arcillosa. Finalmente, en la tabla 11, se presentan los valores obtenidos de las pruebas de absorción capilar.

Al final de este apartado se confrontan los resultados y finalmente se presentan algunas conclusiones respecto al comportamiento estructural de las tapias y al funcionamiento de sus componentes.

### Mezclas originales

A continuación se muestran los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión simple, de las mezclas originales encontradas en campo:

Tabla 8. Resumen de resistencia a la compresión de las mezclas a los 30, 90 y 180 días

Mezcla	Resistencia a la compresión simple (kgf/cm <sup>2</sup> ) (promedio de los seis especímenes por mezcla)		
	30 días	90 días	180 días
T-1	34.84	27.31	30.47
T-2	51.33	20.36	14.69
T-3	16.85	15.18	14.29
F-1	18.85	21.78	25.14
F-1a	33.97	35.28	38.75

T-1 Residuo de cal, piedra pómez, *cacahuatillo* y barro *renegrido*

T-2 Residuo de cal, tezontle, *cacahuatillo* y barro *renegrido*

T-3 Residuo de cal, piedra pómez y *cacahuatillo*

F-1 Cal aérea, arena, piedra pómez y *cacahuatillo*

F-1a Cal aérea, arena, piedra pómez, *cacahuatillo* y barro *renegrido*

A la luz de estos datos, se analizan las resistencias obtenidas, en función del tiempo de fraguado y la combinación de los distintos materiales, poniendo especial atención al papel que juega la tierra como parte del sistema.

### Mezcla T-1

La mezcla original se mantuvo más o menos estable, presentando ligeros decrementos, ya que la prueba inicial de un mes resistió 34.84 kgf/cm<sup>2</sup>, decreciendo a 30.47 kgf/cm<sup>2</sup> a los seis meses.



Figs. 115 y 116. Mezcla T-1, prueba en Laboratorios de edificación sustentable. (Fotografías: acervo del LABPySCT).

#### Mezcla T-2

En este caso, en el que la piedra pómez es sustituida por tezontle, se observó un fenómeno de reducción de la resistencia, pues la primera tanda de probetas cuyo añejamiento fue de apenas 30 días, la resistencia fue de 51.33 kgf/cm<sup>2</sup>, teniendo un drástico decremento a los seis meses, con una resistencia de 14.69 kgf/cm<sup>2</sup>. Se infieren dos posibles causas: la primera, que el excedente de cal no tuvo la suficiente cantidad de óxido e hidróxido de calcio para consolidar las reacciones puzolánicas, y la otra, que el *cacahuatillo* tiene un comportamiento inestable, debido a la posible presencia de sulfatos en su composición, lo que inhibe la acción de la cal (Fernández, 1982:250) fenómeno que se ha observado al analizar distintas combinaciones de materiales, cuyos resultados se presentan más adelante en este capítulo.



Figs. 117. Mezcla T-2, prueba en Laboratorios de edificación sustentable. (Fotografías: acervo del LABPySCT).



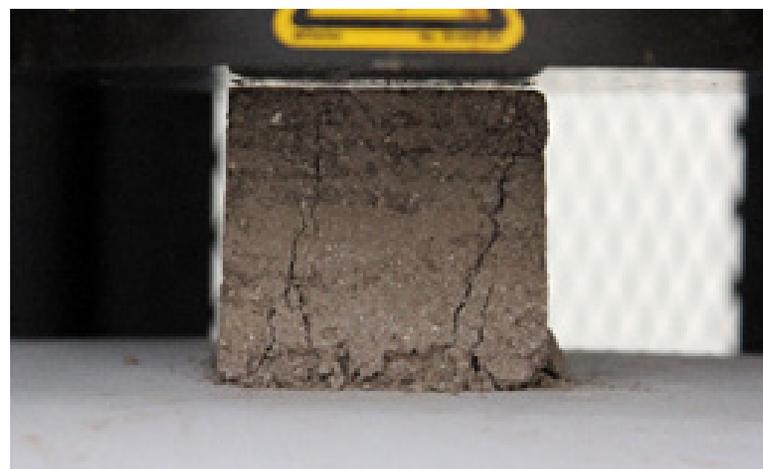
Figs. 118. Mezcla T-2, prueba en Laboratorios de edificación sustentable. (Fotografías: acervo del LABPySCT).

### Mezcla T-3

Al retirar la tierra, además de presentar un decremento significativo en la resistencia a la compresión, la mezcla tuvo ligeros decrementos con el paso del tiempo, lo que hace inferir que la reacción puzolánica no es solamente entre la cal y la piedra pómez, sino también con las arcillas de la tierra adicionada, cuya función es fundamental para la resistencia de estas tapias. La resistencia inicial a los 30 días fue de  $16.85 \text{ kgf/cm}^2$ , y decreció a  $14.29 \text{ kgf/cm}^2$  a los 180 días de fraguado.



Figs. 119 y 120. Mezcla T-3, prueba en Laboratorios de edificación sustentable. (Fotografías: acervo del LABPySCT).



### Mezcla F-1

Esta mezcla sí tuvo un incremento paulatino en su resistencia con el paso del tiempo, a los seis meses aumentó un 33%, al pasar de 18.85 kgf/cm<sup>2</sup> en las probetas de un mes, a 25 kgf/cm<sup>2</sup> seis meses después.



Figs. 121 y 122. Mezcla F-1, prueba en Laboratorio de materiales de la UAM-Xochimilco. (Fotografías: acervo del LABPySCT).

### Mezcla F-1a (variante de la mezcla F-1)

Con el fin de verificar la función de la tierra, aunque en la localidad de El Fuerte no se acostumbra la incorporación de este material, se agregó *barro renegrido* a la mezcla en la misma proporción que en la mezcla T-1 y se observaron incrementos significativos en la resistencia a la compresión, y también una progresión en la resistencia con el paso del tiempo: los resultados son 33.97 kgf/cm<sup>2</sup> en las probetas de un mes, y 38.75 kgf/cm<sup>2</sup> en las de seis meses, que representan incrementos del orden de 80% con respecto a la mezcla sin tierra.

En los últimos dos casos, donde la resistencia sí se incrementa con el paso del tiempo, se puede inferir que el resultado se debe a que se tiene mayor control en la cantidad de hidróxido de calcio que se agrega a la mezcla, situación que no es posible mantener constante cuando se utiliza el residuo de cal, donde no hay manera de controlar ni la cantidad ni la calidad del óxido e hidróxido de calcio presentes en la mezcla. Otra conclusión de esta variación es que la tierra sí juega un papel determinante en la cohesión de los materiales y los incrementos en las resistencias mecánicas.



Figs. 123 y 124. Mezcla F-1a, prueba en Laboratorio de materiales de la UAM-Xochimilco. (Fotografías: acervo del LABPySCT).

Materiales analizados por separado y en combinaciones varias

En la siguiente tabla se presentan los resultados de las variantes experimentales detalladas en la tabla 4.

Tabla 9. Resumen de resistencia a la compresión de las mezclas experimentales a los 30, 90 y 180 días

Mezcla	Resistencia a la compresión simple (kg/cm <sup>2</sup> ) (Promedio de los seis especímenes por mezcla)		
	30 días	90 días	180 días
E-1	25.6	-	-
E-2	14.68	19.28	19.69
E-3	17.58	22.5	21.59
E-4	12.05	14.81	13.82
E-5	N/D	21.64	27.34
E-6	N/D	26.51	27.74
E-7	N/D	41.34	51.9
E-8	N/D	23.83	22.97
E-9	30.96	N/D	N/D

E-1 Barro *renegrido*

E-2 Residuo de cal

E-3 Residuo de cal con piedra pómez

E-4 Residuo de cal con *cacahuatillo*

E-5 Residuo de cal con tezontle

E-6 Residuo de cal con *cacahuatillo* y tezontle

E-7 Residuo de cal con *barro renegrido* y tezontle

E-8 Residuo de cal con *barro renegrido* y piedra pómez

E-9 Residuo de cal con *barro renegrido* y *cacahuatillo*

### E-1 Barro renegrido

La tierra, a pesar de ser considerada un material bastante inestable debido a las conclusiones de la prueba de Atterberg y la clasificación del Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), por la gran cantidad de limos que contiene, tuvo una resistencia bastante buena según los parámetros de la norma peruana E.080 *Diseño y construcción con tierra reforzada* (2017), que indica valores mínimos admisibles de 10.2 kgf/cm<sup>2</sup> (1MPa). El resultado fue de 25.6 kgf/cm<sup>2</sup>, que duplica el valor mínimo admisible en esta norma.

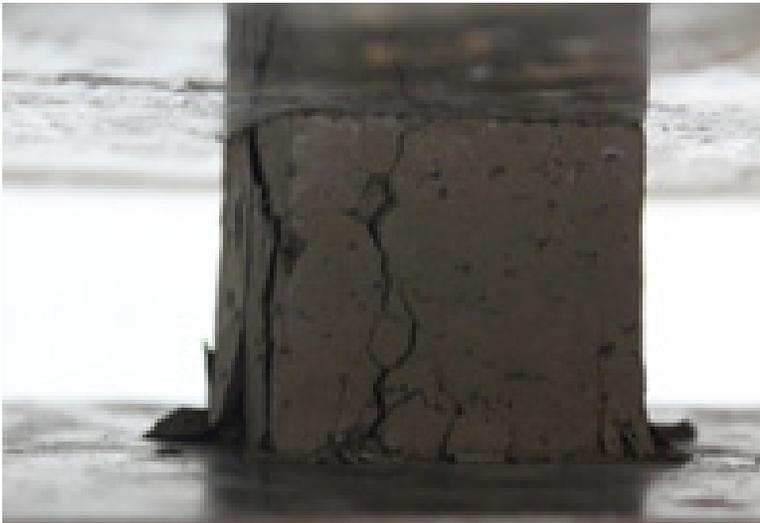


Fig.125. Mezcla E-1, prueba en Laboratorio de materiales de la UAM-Xochimilco. (Fotografías: acervo del LABPySCT).



Fig. 126. Mezcla E-1, prueba en Laboratorio de materiales de la UAM-Xochimilco. (Fotografías: acervo del LABPySCT).

### E-2 Residuo de cal

Las probetas de excedente de cal, se mantuvieron estables con el paso del tiempo, con variaciones poco significativas. Su resistencia también es bastante aceptable, ya que esta mezcla equivale a un mortero de cal, los valores admisibles por las normas consultadas para este tipo de morteros indican una resistencia mínima de 8.16 a 11.22 kgf/cm<sup>2</sup> (0.8 a 1.1 MPa). Los valores de esta mezcla oscilaron entre 14.68 kgf/cm<sup>2</sup> y 19.69 kgf/cm<sup>2</sup>, superando los mínimos aceptables.



Figs. 127 y 128. Mezcla E-2, prueba en Laboratorios de edificación sustentable. (Fotografías: acervo del LABPySCT).



#### E-3 Residuo de cal con piedra pómez

Se observó un fenómeno curioso, su resistencia incrementa hasta llegar a un pico máximo a los seis y siete meses. Sin embargo, en probetas que casualmente se tenían almacenadas, su resistencia a los nueve meses presentó un decremento de casi 50%. El pico máximo a los tres meses fue de  $22.5 \text{ kgf/cm}^2$ , mientras que la resistencia a los nueve meses bajó a  $10.78 \text{ kgf/cm}^2$ .

Es también importante señalar como esta mezcla tiende a desmoronarse más fácilmente, como puede apreciarse en las fotografías.



Fig. 129. Mezcla E-3, prueba en Laboratorios de edificación sustentable. (Fotografías: acervo del LABPySCT).



Fig. 130. Mezcla E-3, prueba en Laboratorios de edificación sustentable. (Fotografías: acervo del LABPySCT).

#### E-4 Residuo de cal con *cacahuatillo*

Esta mezcla se mantuvo estable, con un ligero decremento con respecto a la prueba intermedia de tres meses. Inició a los 30 días con  $12.05 \text{ kgf/cm}^2$ , a los tres meses resistió  $14.81 \text{ kgf/cm}^2$  y finalmente, a los 180 días bajó a  $13.82 \text{ kgf/cm}^2$ . Las probetas hechas con esta mezcla tienden al desmoronamiento, quedando prácticamente pulverizadas después de la prueba de compresión.



Figs. 131 y 132. Mezcla E-4, prueba en Laboratorios de edificación sustentable. (Fotografías: acervo del LABPySCT)..

#### E-5 Residuo de cal con tezontle

Esta mezcla sí incrementó su resistencia con el tiempo, sin disminuirla una vez pasado el punto pico. La resistencia máxima a los seis meses fue de 27.34 kgf/cm<sup>2</sup>. Es importante mencionar también que presenta resistencias del doble que las mezclas anteriores.

También es posible apreciar que las probetas se desmoronan después de las pruebas de compresión, lo que corrobora la hipótesis de las cualidades cohesivas de la tierra.



Fig. 133. Mezcla E-5, prueba en Laboratorios de edificación sustentable. (Fotografías: acervo del LABPySCT).



Fig. 134. Mezcla E-5, prueba en Laboratorios de edificación sustentable. (Fotografías: acervo del LABPySCT).

#### E-6 Residuo de cal con *cacahuatillo* y tezontle

Esta mezcla se comportó de manera similar a la anterior, incluso con un ligero incremento de la resistencia a los tres meses. Los rangos oscilaron entre 26.51 kgf/cm<sup>2</sup> y 27.74 kgf/cm<sup>2</sup>. Por el comportamiento observado en las mezclas en las que predominan el cacahuatillo y la piedra pómez, es posible inferir que las resistencias más altas se obtienen con la combinación de la cal con el tezontle.

Aquí también puede observarse el desmoronamiento de la probeta por la falta de barro.



Figs. 135 y 136. Mezcla E-6, prueba en Laboratorios de edificación sustentable. (Fotografías: acervo del LABPySCT).

E-7 Residuo de cal con *barro renegrido* y tezontle  
Esta combinación tuvo excelentes resultados, con una resistencia máxima a los seis meses de 51.90 kgf/cm<sup>2</sup>, sin presentar decrementos con el paso del tiempo. Al agregar el barro, casi duplicó el valor de su resistencia en comparación con la mezcla que solo contiene residuos de cal.

También es importante observar que la probeta sufrió menor deterioro que las que no contienen barro.



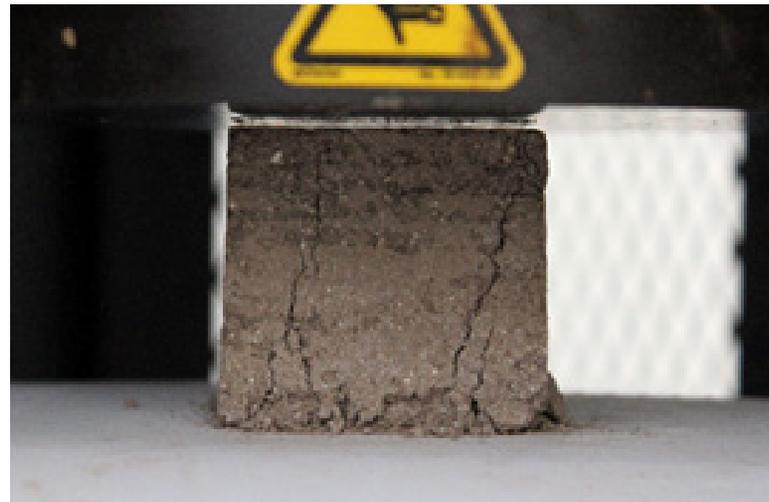
Fig. 137. Mezcla E-7, prueba en Laboratorios de edificación sustentable. (Fotografías: acervo del LABPySCT).



Fig. 138. Mezcla E-7, prueba en Laboratorios de edificación sustentable. (Fotografías: acervo del LABPySCT).

E-8 Residuo de cal con barro renegrido y piedra pómez  
En esta mezcla la resistencia de las probetas se mantuvo estable, alrededor de los 23 kgf/cm<sup>2</sup>, conservando el rango promedio de resistencia de estas tapias.

En estas imágenes es posible observar un desmonoramiento menor de la probeta que las mezclas sin barro, por lo que una vez más se corrobora la inferencia respecto a la función cohesiva del barro.



Figs. 139 y 140. Mezcla E-8, prueba en Laboratorios de edificación sustentable. (Fotografías: acervo del LABPySCT)..

E-9 – Residuo de cal con barro renegrido y cacahuatillo  
 Sorpresivamente, de las mezclas experimentales ésta fue la que tuvo mayor resistencia. El comportamiento entre el cacahuatillo, el barro y la cal resultó bastante estable, contra los pronósticos de las mezclas con cacahuatillo que no contienen barro. Muestra un comportamiento similar a la mezcla anterior –residuo de cal con barro y piedra pómez., pero con un ligero incremento en la resistencia a la compresión.

Es importante señalar además que las probetas no se desmoronaron del todo tras la prueba, como se ha podido observar con las que no contienen barro.

Estos resultados permiten corroborar la importante función aglomerante del barro, que hasta ahora prueba ser el elemento que mantiene con mayor estabilidad las mezclas.



Figura 141



Figs. 141 y 142. Mezcla E-9, prueba en Laboratorios de edificación sustentable. (Fotografías: acervo del LABPySCT).

#### Mezclas con tierra arcillosa

Para finalizar con el análisis de resultados de las pruebas de compresión, se presentan las resistencias obtenidas con la variable que sustituye el *barro renegrido* utilizado en la región por una tierra con mayor contenido de arcilla, descritas en la tabla 6.

Tabla 10. Resumen de resistencia a la compresión de las mezclas con tierra arcillosa a los 30, 90 y 180 días

Mezcla	Resistencia a la compresión simple (kgf/cm <sup>2</sup> ) (promedio de los seis especímenes por mezcla)		
	30 días	90 días	180 días
A-1	12.24	-	-
A-2	34.95	32.82	33.87
A-3	-	78.7	80.52

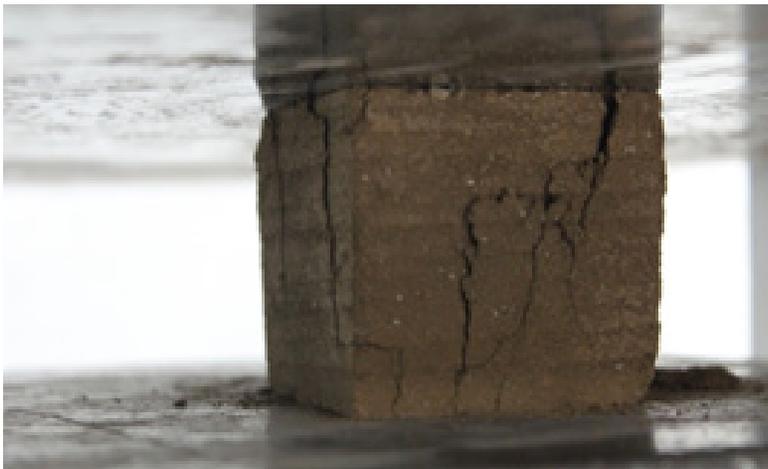
A-1 Tierra arcillosa

A-2 Mezcla original sustituyendo el barro por tierra (residuo de cal, piedra pómez, *cacahuatillo* y tierra arcillosa)

A-3 Residuo de cal, tezontle y tierra arcillosa

A-1 Tierra arcillosa

La resistencia a la compresión de esta tierra resultó ser de la mitad que la resistencia del *barro renegrado* de Tepeyahualco, 12.24 kgf/cm<sup>2</sup> contra 25 kgf/cm<sup>2</sup>. Aún así, su resistencia es admisible según la mayoría de las normas para construir con tierra que están vigentes en la actualidad<sup>14</sup>.



Figs. 143 y 144. Mezcla A-1, prueba en Laboratorio de materiales de la UAM-Xochimilco. (Fotografías: acervo del LABPySCT).

A-2 Mezcla original sustituyendo el barro por tierra  
Con esta combinación se obtuvieron resistencias ligeramente mayores que la mezcla original, a pesar de que la tierra por sí sola resiste menos, como se explicó en el párrafo anterior. Esto puede deberse a que estas arcillas tienen una reacción distinta entre la cal y las puzolanas del tezontle (Figs. 148 y 149).

---

14. La norma peruana indica una resistencia mínima a la compresión de 10.2 kgf/cm<sup>2</sup> (1MPa). Par mayor detalle consultar *Norma E.080 diseño y construcción con tierra reforzada* (2017).



A-3 Residuo de cal, tezontle y tierra arcillosa  
Esta combinación presentó excelentes resultados, obteniendo las resistencias más altas de todas las mezclas al llegar a 80 kgf/cm<sup>2</sup>, con un valor superior a 100% sobre el promedio de resistencia de los demás compuestos.



Figs. 145 y 146. Mezcla A-2, prueba en Laboratorio de materiales de la UAM-Xochimilco. (Fotografías: acervo del LABPySCT).



Figura 147



Figs. 147 y 148. Mezcla A-3, prueba en Laboratorios de edificación sustentable. (Fotografías: acervo del LABPySCT).

### Pruebas de absorción capilar

En cuanto a los resultados de las pruebas de absorción capilar, se presenta el resumen de los ensayos en la tabla 11.

En esta tabla puede apreciarse que los rangos de absorción de las distintas mezclas oscilan entre 8 y 32%. El residuo de cal es el que menos absorbió humedad, seguido por las mezclas que combinan este material con tezontle.

Las mezclas que absorben mayor cantidad de agua son las que contienen piedra pómez, seguidas por las de *cacahuatillo*, ambas en combinación con el barro renegrido, aunque contengan cal. La mezcla que más

Tabla 11. Resumen de pruebas absorción capilar

Mezcla	Composición	Absorción capilar 10 min. (%)	Inmersión total 24 hrs (%)
T-1	Residuo de cal, piedra pómez, <i>cacahuatillo</i> y <i>barro renegrido</i>	27.40	32.57
T-2	Residuo de cal, tezontle, <i>cacahuatillo</i> y <i>barro renegrido</i>	16.70	21.61
T-3	Residuo de cal, piedra pómez y <i>cacahuatillo</i>	24.77	27.44
E-1	<i>Barro renegrido</i>	23.60	en 5 min se desmoronó
E-2	Residuo de cal	8.18	15.33
E-3	Residuo de cal con piedra pómez	17.62	24.77
E-4	Residuo de cal con <i>cacahuatillo</i>	10.07	21.09
E-5	Residuo de cal con tezontle	12.70	15.07
E-6	Residuo de cal con <i>cacahuatillo</i> y tezontle	15.60	22.32
E-7	Residuo de cal con <i>barro renegrido</i> y tezontle	16.84	19.66
E-8	Residuo de cal con <i>barro renegrido</i> y piedra pómez	17.81	27.92
A-1	Tierra arcillosa	15.16	en 12 min se desmoronó
A-2	Mezcla original sustituyendo al barro por tierra arcillosa	13.99	25.88
A-3	Residuo de cal, tezontle y tierra arcillosa	11.61	13.96

agua absorbió fue la T-1, seguida por la E-8 y la A-2 y T-3; así como la E-8 que contiene sólo barro y piedra pómez.

En cuanto a las tierras, la que tiene mayor contenido de arcilla absorbe menos agua que la tierra limosa.

Es importante señalar que ninguna de las probetas que contienen cal con puzolanas se desintegró o perdió una cantidad significativa de material durante las pruebas, incluso en el ensayo de inmersión total de 24 horas (Figs. 153 y 154).



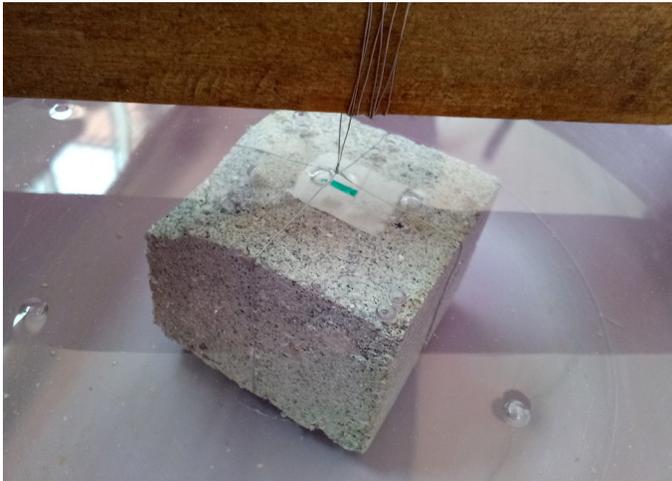
Fig. 149. Preparación de probetas para pruebas de absorción capilar (Fotografías: acervo del LABPySCT).



Figs. 150 y 151. Pesado de la probeta antes y después de la prueba de inmersión parcial (Fotografías: acervo del LABPySCT).



Figura 152. Prueba de absorción capilar de mezclas que contienen cal y puzolanas. (Fotografía: acervo del LABPySCT).



Figs. 153 y 154. Ejemplo de una prueba de inmersión total de 24 horas de mezclas que contienen cal y puzolanas. La probeta resultó prácticamente intacta al finalizar la prueba (Fotografías: acervo del LABPySCT).

Respecto a las pruebas de absorción capilar de probetas de barro, estas se desintegraron rápidamente tanto en las de absorción parcial como en las de inmersión total; incluso antes de terminar las pruebas (Figs. 155 y 156).



Figs. 155 y 156. Ejemplo de una prueba de absorción capilar de probetas de barro. Obsérvese la rápida absorción capilar, la probeta se desintegró antes de terminar la prueba (Fotografías: acervo del LABPySCT).

Para finalizar, con el fin de corroborar la resistencia mecánica de las tapias, se hicieron tres pruebas de las mezclas originales después de seis meses de haber sido sometidas a las pruebas de inmersión total. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 12. Comparación de resistencias después de los ensayos de absorción capilar

Mezcla	Resistencia a la compresión simple (kgf/cm <sup>2</sup> )		Porcentaje de disminución
	Condiciones normales (180 días)	Después de la prueba de inmersión	
T-1	30.47	22.39	26%
T-3	14.29	11.69	18.19%
F-1	25.14	19.96	20.60%
F-1a	38.75	18.66	51.84%

La disminución gira alrededor del 20%, excepto en la tercera muestra, que bajó al 50%. Faltaría analizar lo que sucede con las mezclas con tezontle, y realizar las pruebas de compresión a probetas con inmersión parcial de 10 a 60 minutos con el fin de obtener datos más cercanos a las condiciones reales del sitio, ya que es poco probable que en esta región poco lluviosa se produzca una inundación que anegue por completo las tapias.

## Discusión de resultados

A la luz de los resultados presentados en relación con la pruebas de compresión, es posible concluir que las mezclas con barro tienen una mayor resistencia en rangos bastante similares. Éste además tiene la propiedad de contribuir a la cohesión de los elementos al evitar que el muro se desmorone, ya que se observó tanto en campo como en el laboratorio que las tapias y las probetas que carecen de barro son más frágiles.

Todas las mezclas que llevan tierra tuvieron incrementos en su resistencia con respecto a las mezclas que no la llevan, excepto en la mezcla T-2, cuyo caso se expone más adelante. Estos incrementos son de orden de 45% en promedio, pero algunas mezclas llegan a duplicar su resistencia. También es importante señalar que al introducir una tierra con mayor contenido de arcilla, las resistencias se incrementaron, aunque no significativamente, excepto en el caso de la mezcla con tezontle, que fue la que alcanzó la máxima resistencia de todas las pruebas llevadas a cabo en esta fase de investigación (80.52 kgf/cm<sup>2</sup>).

Estos números arrojan resultados interesantes, pues en las primeras inferencias producto de los estudios hechos en campo, existía la hipótesis de que la función de la tierra en estas tapias influía poco en la resistencia y la conformación del sistema; en parte debido a la deducción de que las reacciones puzolánicas entre la cal y las piedras volcánicas empleadas en las mezclas aportaban la mayor resistencia; y al hecho de que el barro es un material un tanto inestable en su comportamiento plástico debido a la fuerte cantidad de limos, como se pudo constatar en la fabricación de las probetas de barro aislado.

Sin embargo, estos supuestos resultaron falsos, pues como puede apreciarse en los resultados presentados, las resistencias más bajas son las de mezclas de piedra pómez y *cacahuatillo* con el residuo de cal, que se encuentran por debajo del 50% con respecto a las resistencias obtenidas en las mezclas que incorporan el barro. También se observó que todas las mezclas que registran decrementos, por pequeños que sean, tienen *cacahuatillo* entre sus componentes.

Estos decrementos y bajas resistencias pueden deberse a los siguientes factores:

- Que el residuo de cal no tenga suficiente cantidad de hidróxido de calcio, lo cual se infiere a partir de los resultados de la mezcla F-1, donde la dosificación de la cal está controlada, y cuya resistencia incrementó sin decrecer con el tiempo, y que involucra *cacahuatillo*.
- Que la acidez presente en los suelos o los sulfatos que puedan estar presentes tanto en la piedra pómez como en el *cacahuatillo*, inhiban la acción de la cal (Fernández, 1982:252), lo cual se descartaría corroborando con pruebas sustituyendo el residuo de cal por cal aérea y arena, con dosificaciones controladas, tal como en la mezcla de El Fuerte (F-1).

Solamente es necesario precisar que existe una excepción a estas afirmaciones, pues la mezcla original con tezontle (mezcla T-2) cuya resistencia inicial (30 días) fue de las más altas decayó con el paso del tiempo. Este hecho debe corroborarse con más pruebas para

identificar qué componentes interfieren en el proceso de fraguado y puzolanización, o si estos decrementos se deben a un error de procedimiento; ya que estos valores están fuera de rango pues el decremento fue del orden de 72%; y no concuerdan con los parámetros observados en el resto de las mezclas que contienen tezontle.

Respecto a la composición del residuo de cal, que puede presentar variaciones, las pruebas de laboratorio han demostrado que son poco significativas, ya que contiene la cantidad suficiente de hidróxido de calcio para mantener las resistencias en rangos bastante uniformes, solo se registran diferencias del 1 al 3%.

Por otro lado, la cal aérea sí presentó constantes en las pruebas realizadas con la mezclas F-1 y F-1a, aunque es necesario hacer más ensayos con las mismas variables utilizadas para el residuo de cal.

El tezontle es la roca volcánica que presenta mejores resistencias, y mejora aún más al incorporar tierra con mayor cantidad de arcillas a la mezcla. Cabe señalar que las resistencias más altas se obtuvieron con tezontle, residuo de cal y tierra arcillosa. Será necesario hacer estas mismas pruebas con cal aérea.

Además de los fenómenos químicos de puzolanización, ampliamente discutidos en este trabajo, el hidróxido de calcio puede endurecer lentamente si interactúa con el dióxido de carbono del aire, que es la reacción más conocida de esta sustancia. Entonces, el fraguado de estas tapias se vincula con una doble acción de la cal: como un proceso aéreo en las áreas externas

del sistema y como una reacción puzolánica en su interior en donde no hay presencia de aire, pero sí de agua.

Para terminar, es importante destacar que se observó en algunas tapias documentadas en campo, el desmoronamiento de las mismas a lo largo del tiempo. Este fenómeno también sucedió con la tapia que se fabricó en el sitio de estudio, y que posteriormente se extrajo un trozo para hacer pruebas de compresión, sin embargo, la tapia sufrió un deterioro que la llevó al desmoronamiento y no fue posible realizar la prueba.

Estos hechos pueden deberse a las siguientes causas:

- La humedad relativa de Tepeyahualco, que en ocasiones está por debajo del 20%. Así, retomando la explicación que da Sámano (2018) y que ha sido detallada en el capítulo anterior en el apartado concerniente al ciclo de la cal, se ha demostrado que la carbonatación empieza a complicarse cuando la humedad baja de 40%, identificándose que debajo del 20%, este fenómeno se vuelve imposible. Los rangos óptimos rondan el 60% de humedad relativa. Esto implica que el cuidado de la humedad es vital para promover el proceso de carbonatación, que como se explicó anteriormente, es la reacción que se da en la parte externa de estas tapias.
- Otro factor para explicar este fenómeno, puede deberse a la insuficiente humedad en términos de la hidraulicidad del material, ya que los procesos de fraguado hidráulicos, capaces de endurecer en el aire saturado de humedad e incluso sin aire, bajo el agua, requieren grandes cantidades de agua.
- Otra explicación posible es que, ya que se infiere que el residuo de cal de Tepeyahualco contiene partículas de óxido de calcio, según Sámano (2018)

la cal apagada aumenta su volumen (el hidróxido de calcio ocupa un volumen aproximadamente 20% mayor que el del óxido de calcio); y si se prepara un mortero con cal recién apagada, todavía con partículas sin laminar, existe el riesgo de que la cal se expanda una vez colocada, lo que puede alterar las mezclas mediante el fenómeno que Olga Callazas citada por Sámano en el mismo documento, llama “palomeo del muro”, que consiste en que un mal apagado del óxido de calcio supone la existencia de partículas de cal viva que pueden hidratarse posteriormente en el interior del mortero o de cualquier otro material, y provocar estos fenómenos de ruptura. Esto es importante de destacar, ya que se observaron algunas rupturas en las tapias documentadas que coinciden con esta descripción (Fig. 157).



Fig. 157. En la esquina superior de esta tapia puede observarse el fenómeno de “palomeo del muro” (Fotografía: acervo del LABPySCT).

Para terminar, en lo que respecta al análisis de las pruebas de capilaridad, a pesar de que algunas tapias resisten menos que las tapias de tierra, según un estudio hecho en la zona en el año 2014 que señala resistencias a la compresión simple que oscilan entre los 21 y 26 kgf/cm<sup>2</sup> (Rodríguez, 2014:208), el hecho de que la mezcla de materiales produzca un elemento más rígido y menos susceptible a ser dañado por la humedad, permite reducir el espesor del muro casi a la mitad con respecto a las tapias de tierra.

Finalmente, la evidencia definitiva de la actividad puzolánica de un material es su resistencia, combinada con su durabilidad. Tal como afirma Sepulcre (2005), a través de exhaustivas investigaciones se han dado casos de puzolanas que no pasan con éxito las pruebas de puzolanicidad, pero a pesar de eso tienen una buena actividad puzolánica.

A través de las pruebas realizadas en esta investigación, se ha demostrado la actividad puzolánica, ya que no sólo se han incrementado las resistencias a lo largo del tiempo, sino que se ha demostrado su durabilidad, ya que al someterlas nuevamente a pruebas de resistencia, después de haber sido sometidas a la prueba de absorción total de agua durante 24 horas, las probetas, aunque disminuyeron un poco su resistencia en condiciones totalmente adversas, esta se mantiene en rangos aceptables.

## **Aportaciones**

### Del sistema constructivo

Una de las principales aportaciones de este sistema es la de haber producido un hormigón que tiene propiedades singulares, pues además de tener un esqueleto rocoso, éste mismo tiene los aditivos para mejorar las propiedades del conjunto en términos de resistencias mecánicas más altas, mayor rigidez y mayor resistencia al agua. Este sistema presenta las siguientes ventajas:

- Aprovechamiento de la disponibilidad geográfica de los materiales de la región
- Bajos costos de obtención
- Con algunos ajustes producto del trabajo de laboratorio, tiene la posibilidad de una mayor adaptación a otras posibles propiedades: mayores resistencias, variedad en textura, aprovechamiento del color de los materiales como el tezontle, menor fragilidad, entre otras.
- La posibilidad de moldearlo, a diferencia de la construcción con roca natural que también se produce en la región, donde se desperdicia mucho material en el proceso de extracción y labrado.

### Del trabajo de laboratorio

En este aspecto es de destacar los hallazgos de la combinación con tezontle, cal y tierra. Las pruebas mecánicas arrojaron resistencias suficientemente altas, comparables con los muros de mampostería de tabique rojo recocido, block y tabicón de cemento, y susceptibles

de competir con estos materiales en términos económicos, ecológicos y técnicos.

Un segundo punto a destacar es la maleabilidad que da el barro a las mezclas, ya que las estructuras que contienen tierra o barro, aunque fallen, no se desmoronan como las mezclas que no lo contienen. Esta propiedad puede contribuir para ser un factor de protección en caso de desastre, ya que las mezclas que contienen barro, aunque presenten fatigas y fallas estructurales no se desploman del todo, lo que da oportunidad de evacuar en caso de daño estructural, sobre todo en casos de sismo; cosa que no sucede con las mezclas que no contienen barro, que tienden a desmoronarse con mayor facilidad.

Estos descubrimientos dan pauta para proponer mejoras a la mezcla a través de ligeras variaciones con los mismos recursos del sitio, sin añadir recursos externos ni modificar sustancialmente la mezcla de materiales, lo que abona a la discusión de la hipótesis en las conclusiones de este documento.

### **Futuras investigaciones**

Finalmente, para concluir este capítulo, se presentan algunas inquietudes que fueron surgiendo durante el desarrollo de la investigación en los aspectos técnicos del proceso experimental, y que no pudieron desarrollarse por diversas causas, entre ellas, la falta de tiempo.

En primer lugar, para consolidar el entendimiento de la tierra dentro del sistema, es deseable realizar otras pruebas en función de la premisa de que la tierra aporta mayor resistencia que las mezclas que no la tienen; mediante ensayos incrementando la dosificación de la

tierra, así como probar con otro tipo de arcillas, para confirmar y estudiar con mayor profundidad la interacción de las arcillas con el hidróxido de calcio.

Por otro lado, es importante analizar las resistencias a la compresión de las tapias originales in situ, mediante muestras que puedan ser probadas en laboratorio, pues la inferencia inicial de que este sistema constructivo tiene mayor resistencia que las tapias de tierra, producto de la reducción en el espesor del muro, 25 cm en promedio, la mitad que las tapias tradicionales hechas sólo de tierra de la región de Puebla y Tlaxcala, no siempre resultó cierto, según se explicó en el capítulo 5 en los trabajos experimentales.

En cuanto a los decrementos en las resistencias, es necesario corroborar con pruebas sustituyendo el residuo de cal por cal aérea y arena, con dosificaciones controladas tal como en la mezcla de El Fuerte (F-1), para descartar que haya posibles interferencias entre algunos sulfatos presentes en las rocas volcánicas y la cal, como explica Fernández (1982).

Otro estudio que deberá hacerse son pruebas mecánicas a cortante, que den pistas sobre los esfuerzos horizontales ya que Tepeyahualco se encuentra en zona sísmica, aunque de intensidad media, ya que algunas probetas de muestra que se tronaron en el sentido contrario al apisonado resistieron la mitad, aunque no en todos los casos.

Otra posibilidad para futuras investigaciones, respecto a la fragmentación y desmoronamiento de las tapias, será incrementar la dosificación de agua, o expe-

rimentar con el curado de las tapias; y otra más, hacer pruebas con la cal “apagada”, dejándola remojar varios días para activar aún más los cristales de calcita e hidratar las partes que aún se conservan de óxido de calcio en el residuo de cal; ya que en varios estudios (Sámano, 2018) se ha demostrado que la maduración de la cal en el proceso de apagado da como resultado la formación de partículas cada vez más finas, que redundan en una cal con mayor reactividad.

En este mismo sentido, para aumentar la resistencia, convendría adicionar una cierta cantidad de piedra volcánica triturada, además de las rocas en los tamaños tradicionales, con el objetivo de aumentar la superficie específica de las puzolanas y mejorar la reactividad del hidróxido de calcio, además de ayudar a rellenar huecos que se observaron en las tapias registradas y en una muestra traída del sitio, lo que puede llegar a provocar debilitamientos de la estructura. También convendría analizar lo que sugiere la norma en cuanto a proporciones de cal y puzolanas, así como las que proponen Vargas, Zárate y Gutiérrez (2005); 70-75% de puzolanas con 25 a 30% de cal hidratada.

Otra fuente posible de investigación es experimentar la fabricación de estas tapias con puzolanas derivadas de subproductos de procesos industriales o desechos de la industria ladrillera, para ser extrapolados a otros contextos donde existan este tipo de desperdicios que sean susceptibles de ser convertidos en materiales útiles para la construcción.

## CONCLUSIONES



## CONCLUSIONES

El propósito de esta tesis, como se explicó en la introducción, fue estudiar las tapias hechas de residuos de cal, tierra y rocas volcánicas encontradas en el municipio de Tepeyahualco, en Puebla, como parte del proyecto de investigación del LABPySCT, el cual ha buscado hacer un estudio integral de los elementos que conforman las tradiciones constructivas en México, y que ha permitido, a través de trabajos de investigación como éste, entender los sistemas constructivos tradicionales y sus arquitecturas no sólo desde las dimensiones técnica y estética como se hace normalmente, sino también desde los contextos donde se practica, permitiendo dar más herramientas para el entendimiento de las motivaciones por las cuales estas arquitecturas vernáculas -en el sentido en que ha sido explicado este término en el marco de referencia- y sus saberes constructivos son considerados parte de un patrimonio tangible e intangible de la humanidad. En este trabajo se ha planteado cómo al documentar, estudiar y experimentar estas tradiciones constructivas es posible contribuir a generar conocimiento en el campo de la sostenibilidad en la arquitectura en términos económicos, técnicos, sociales, culturales y ambientales. Al haber finalizado esta investigación, se presentan una serie de reflexiones en un intento por sintetizar lo que fue posible alcanzar en el desarrollo de los temas tratados a lo largo de los capítulos de este trabajo.

La estructura de este apartado comienza por confrontar la hipótesis planteada, así como los objetivos y las preguntas de investigación, seguida de las conclusiones, las aportaciones del trabajo, los hallazgos no previstos durante el camino y que pueden dar pie a

futuras investigaciones, así como lo que no fue posible responder pero que también es materia de indagaciones subsecuentes.

En cuanto a las preguntas de investigación planteadas: ¿Qué factores incidieron en que este sistema haya surgido?, ¿de qué manera, ante la homogeneización de la cultura a escala mundial y la globalización socioeconómica, los sistemas constructivos tradicionales aún vivos en algunas poblaciones rurales de nuestro país, pueden transformarse desde su propio contexto cultural? y ¿qué lecciones se pueden aprender de las tradiciones constructivas para ser aplicadas en los temas de la sostenibilidad de la arquitectura? En primer lugar, se exponen una serie de reflexiones en relación con los dos primeros cuestionamientos:

Por medio del análisis y revisión de aspectos relacionados con el medio natural, fue posible identificar los recursos existentes en la región estudiada, los materiales utilizados para las diversas tareas de construcción y las condiciones climático-ambientales que determinaron las soluciones en el campo de la tecnología constructiva. Como resultado de este estudio, es posible asegurar que hubo una auténtica comprensión y adaptación al medio físico-geográfico, que es evidente en las tapias estudiadas.

La información encontrada en fuentes documentales y comparada a través de la documentación directa, levantamientos y registros realizados, demuestran que los habitantes de la región estudiada conocían y siguen conociendo su medio, y existe una identificación con los recursos naturales de la localidad que han sabido utilizar como materiales para la edificación, transformándolos

para diversos fines de carácter constructivo, encontrando soluciones adecuadas para el momento histórico estudiado y la necesidad de ese momento específico -vivienda emergente para resolver un asentamiento nuevo de manera rápida y expedita-, conforme a las condiciones climáticas y ambientales del entorno –un clima agreste con poca lluvia y escasez de agua-. Así, se pudo detectar que estas soluciones constructivas de la zona y etapa temporal estudiada, son resultado de la fusión de ideas y voluntades de solución a los diferentes problemas en el diseño y la manufactura de las edificaciones. Son evidentes la aportaciones de dos tradiciones, además de la fusión previa de conocimientos prehispánicos y españoles, al identificar en el segundo capítulo de esta tesis, elementos y soluciones producto de una técnica local que se ligó a las ideas y necesidades constructivas y espaciales proporcionadas tanto por los conocimientos provenientes de culturas ancestrales, como de la cultura proveniente de la península ibérica.

A partir del estudio de estas tapias, es posible concluir que efectivamente es factible que estos sistemas puedan caminar dentro de sus propios contextos socioeconómicos y culturales. Este sistema constructivo ha surgido a partir de las arquitecturas locales y sus maneras de construir, adaptando los antiguos sistemas de las tapias de tierra y de los terrados de piedra pómez y cal, a las necesidades contemporáneas, echando mano de los conocimientos heredados de generación en generación, y continuando con una cadena de transmisión que no ha sido rota, a pesar de la introducción de materiales y técnicas constructivas industrializadas. El conocimiento local es aún valorado, situación que no se observa en

otros sitios y tradiciones constructivas del país. Es posible concluir entonces, que un factor determinante para que estas arquitecturas perduren, que va más allá del valor económico y de mercado, es la valoración social del conocimiento, principalmente al interior de la comunidad y por los propios usuarios. Es importante destacar que el saber hacer continua presente en este sistema: esta cualidad, transmitida de generación en generación, y que generalmente responde a habilidades de sobrevivencia como cultivo de alimentos y construcción de viviendas, incrementa la capacidad de recuperación de una sociedad y su cultura en caso de perturbaciones. El sistema analizado responde tanto a las necesidades de sus habitantes como a los cambios suscitados en el sitio a lo largo del tiempo; por lo tanto, puede considerarse como una arquitectura tradicional viva que ha respondido a las transformaciones económicas, a las variaciones en la disponibilidad de materiales y a la modificación de los modos de vida.

En este mismo sentido, y en relación con el ámbito sociocultural, en esta investigación se ha considerado como fundamento la visión plural y social que incluye la participación de las comunidades. En este contexto, la sociedad hereda no sólo el patrimonio construido, sino también el conocimiento ancestral; tal como afirma Hegel respecto a la herencia de la tradición “este heredar consiste a la vez en recibir la herencia y trabajarla” (Abagnano, 1963), es así como se mantienen vivos los conocimientos y las sabidurías tradicionales. En este sentido, podemos afirmar que este saber encontrado en el municipio de Tepeyahualco, es una herencia recibida y trabajada. Como primera conclusión a este respecto, se

puede afirmar que el sistema constructivo de tapias de piedra poma y residuos de cal, optimiza procedimientos y materiales respecto a los sistemas constructivos que le han dado origen, ya que ofrece una mayor rapidez en la ejecución pero conservando la simplicidad constructiva, ofrece ahorros en material, un mejor funcionamiento mecánico, un menor mantenimiento y mayores periodos de vida útil. Así, el análisis de esta experiencia de fusión de tradiciones constructivas demuestra la mejora en la eficiencia en el uso de los materiales y mantiene su adaptación al medio ambiente, que aporta elementos que le permiten competir, desde su propia línea evolutiva dentro de la tradición constructiva local, con las influencias de la arquitectura importada de ámbitos urbanos.

En cuanto a la tercera pregunta de investigación, ésta se tornó en una de las más relevantes, a mi juicio, mientras avanzaba la indagación; ya que se descubrieron una serie de lecciones que se pueden aprender de las tradiciones constructivas para ser aplicadas en los temas de la sostenibilidad de la arquitectura. Uno de los puntos fundamentales del que se desprenden múltiples lecciones, es el aprovechamiento de una serie de recursos que en otros contextos tienen poco valor o son considerados desechos, la necesidad de echar mano de lo que se tiene en el entorno inmediato, es en este caso una gran maestra.

En el mismo orden de ideas, la reutilización de estos materiales considerados inservibles, contribuye al fortalecimiento de la economía local y evita la transportación de materiales que repercute en ahorros muy significativos en cuanto a costos económicos y ambientales.

Aquí es posible hacer referencia a la dimensión ética que distingue al conocimiento de la sabiduría, como se ha definido en el marco de referencia de esta investigación, la sabiduría es la habilidad que se desarrolla con la aplicación de la inteligencia en la experiencia, obteniendo conclusiones propias que ofrecen un mayor entendimiento que discierne sobre lo conveniente o no de este conocimiento. He aquí la dimensión ética de la que carece el conocimiento que no ha pasado por la experiencia, y donde es posible hacer que converjan estas dos maneras de conocer y de aprehender: por un lado, a través de la experiencia directa del hacer y por otro, mediante el conocimiento académico.

Respecto a la confrontación de la hipótesis, cuyo punto central fue confirmar la línea evolutiva de los sistemas constructivos ancestrales plasmados en las tapias de Tepeyahualco surgidas a principios del siglo XX, bajo los principios que rigen a las arquitecturas vernáculas, -como el uso de materiales disponibles en la localidad, la transmisión de saberes y habilidades de sobrevivencia de generación en generación, la adaptabilidad a las condiciones económicas y a la transformación en los modos de vida- para generar parámetros de identificación de variables evolutivas que puedan aplicarse en otras tradiciones constructivas del país, con el objetivo evitar su desaparición y detonar procesos para la preservación de estas técnicas tradicionales y para propiciar su actualización en términos de sus propios contextos socioeconómicos y culturales; podemos concluir lo siguiente:

Efectivamente, este sistema constructivo proviene de otros sistemas ancestrales: se combinan dos tradi

ciones constructivas aportando lo más eficiente de cada una de ellas para la solución de un problema constructivo, la construcción de muros. Aquí, en lugar de observar una ruptura, como en la mayoría de los sistemas constructivos tradicionales documentados hasta ahora en el LABPySCT, se manifiesta una continuidad. Este sistema ofrece lecciones sobre el uso de recursos materiales disponibles en la región, la utilización de materiales industriales de desecho, combinándolos de maneras ingeniosas, extrayendo conocimientos de otras técnicas, etc. Conserva las cualidades y atributos del conocimiento ancestral, mediante los siguientes aspectos: utiliza recursos renovables de la localidad, y es un sistema manufacturado con lo mejor del conocimiento de dos sistemas constructivos tradicionales de origen local.

A través de la metodología planteada en esta tesis, se abrió la posibilidad de generar los parámetros mencionados en la hipótesis a través del estudio riguroso tanto de las variables socioculturales, económicas y sobre todo, de las técnicas. En primer lugar, a partir del conocimiento empírico detallado en el segundo y tercer capítulos de esta investigación se intuyó desde la hipótesis que el sistema constructivo tenía buenas posibilidades de ser utilizado en otras escalas arquitectónicas, y potencial para ser usado de mejor manera en la construcción de vivienda. Conforme fue avanzando la investigación, se descubrió que el uso de estas tapias en casa habitación ha sido poco explorado, y se ha abandonado paulatinamente, encontrándose muy poco casos contemporáneos donde se utilice este sistema de manera integral. Llama la atención haber encontrado habitaciones abandonadas, sin finalizar la construcción,

y con la intención de reforzar la estructura con castillos de concreto armado en las esquinas. Se intuye que la cubierta del sistema constructivo no ha sido resuelta del todo, por lo que el uso primordial que se le ha dado es para bardear predios. El estudio técnico detallado en el quinto capítulo, fue el que abrió mayores posibilidades de generar los parámetros buscados tanto en la hipótesis como en los objetivos, mediante el estudio riguroso de las cualidades técnicas del sistema. Este hecho puede extenderse al estudio de diferentes técnicas y tradiciones constructivas, generando así los parámetros que se buscaban en un inicio:

- Adaptabilidad al medio ambiente, el uso de materiales locales y la reutilización de materiales de desecho, así como la adecuación a las condiciones climáticas locales.
- Fortalecimiento de economías regionales, mediante el uso y transformación de materias primas producidas en la comunidad.
- La identificación de variables en el sistema que, con ligeros cambios a partir de un estudio técnico, pueden mejorar significativamente sus procedimientos constructivos así como su eficiencia mecánica y estructural que redunde en un beneficio y mejora en las cualidades habitables del espacio arquitectónico.
- Que la modificación de las variables mencionadas en el punto anterior, impacte positivamente en las economías locales, y por ende, en la sociedad y la cultura del lugar, al contribuir, con estas aportaciones, a la revaloración de las prácticas constructivas específicas de cada comunidad.

De esta manera, el estudio a profundidad de los materiales así como del sistema constructivo, permitió generar parámetros de identificación de variables y de experimentación en otros ámbitos y culturas constructivas, ya que el haber observado y documentado la manera en que se seleccionan los materiales, cómo se transforman mediante procesos muy sencillos y artesanales, y cómo se construyen permiten también sacar lecciones para la manera de hacer y de construir la arquitectura contemporánea. Puede, de manera muy sencilla, simplificarse procesos y experimentar con materiales más accesibles para procesos de autoconstrucción y autonomía, sobre todo en sitios de características geográficas similares, aunque el método de estudio es aplicable a otros ámbitos.

Así, el conocimiento tecnológico de las comunidades puede ser transferido no sólo como una memoria sino como un catalizador para la generación de nuevos conocimientos con esta base, como ha ocurrido en este trabajo de investigación, reconociendo la cultura constructiva local se ha llevado a cabo un intercambio de conocimientos entre los universitarios y las comunidad, a través de los maestros artesanos entrevistados y que amablemente accedieron a transmitir sus conocimientos, y finalmente, se cumple unos de los objetivos centrales planteados en esta tesis: mediante este tipo de trabajos, es posible conservar el conocimiento tradicional y fortalecer su práctica, contribuyendo así a la evolución de estas técnicas y conocimientos dentro de sus propios contextos culturales, ayudando a fortalecer la identidad de las comunidades a través de dignificar la cultura constructiva del sitio mediante el reconocimiento de sus

valores tecnológicos, económicos, sociales y estéticos, dadas por el “aval” de una institución de educación superior, y no porque el conocimiento que aquí se imparte sea de mayor calidad o más relevante que el que se tiene en la comunidad, sino porque hoy en día, el acuerdo social respecto al conocimiento científico es lo que tiene mayor valor. Sin embargo, tomando en cuenta las afirmaciones de Villoro, analizadas en el marco teórico, ambas formas de aprehender el mundo son igualmente válidas, y además, complementarias. Con estos intercambios de conocimiento se enriquecen ambas esferas cognitivas: por un lado, se preservan documentalmente conocimientos orales, se enriquecen las maneras académicas de estudiar los fenómenos y por otro, las instituciones universitarias pueden contribuir a proporcionar alternativas que contribuyan al fortalecimiento tanto de las tradiciones constructivas como del patrimonio cultural y las economías locales.

Finalmente, es importante señalar que esta investigación ofreció una perspectiva de estudio distinta a la que estamos acostumbrados. Permitted estudiar el fenómeno arquitectónico y constructivo desde una perspectiva integral, interactuando con algunos miembros de la comunidad, intentando estudiarlo desde dentro, y no como un observador externo, disminuyendo así la objetivación del estudio, siendo congruentes con lo expuesto en el marco de referencia respecto a la visión integral y al pensamiento sistémico. Adoptar esta postura, o al menos intentarlo, me permitió entender las dinámicas de aprendizaje y transmisión del conocimiento que subyacen en estas tradiciones moderando la típica imposición de valores y prejuicios que tenemos desde

la academia. Este hecho posibilitó frenar el impulso de querer imponer desde fuera formas de vida, valores y soluciones ajenos a estas comunidades, y por el contrario, aprender lecciones de los saberes que ahí se resguardan. Aunque la aportación fundamental de esta tesis está en el estudio técnico del sistema, al haber abordado la investigación mediante el marco de referencia estudiado, el trabajo de campo me permitió conocer de cerca la arquitectura vernácula y sus técnicas, entrar en contacto con la gente que la habita y su cultura, y comprender de mejor manera su razón de ser. Esta manera de abordar el fenómeno de estudio nos acerca a una realidad que pocas veces es contactada, lo que me permitió profundizar en toda la reflexión teórica plasmada en el marco de referencia, y generar un cambio de mirada que ha detonado procesos de comprensión, valoración y respeto por otras maneras de entender el mundo de manera muy significativa. Este estudio pretende ser complementario al conocimiento que ya tienen las comunidades tradicionales, ya que, al no alterar sustancialmente la cultura constructiva, es posible llevar a cabo modificaciones modestas pero profundas, que pueden redundar en beneficios que potencien el sistema en cuanto a posibilidades técnicas, económicas y ambientales, como ya se mencionó anteriormente, sin alterar los contextos en los que se desarrolla.

Como último punto, es necesario mencionar que en este trabajo ha quedado pendiente el ejercicio de la transferencia de conocimientos, mediante el intercambio de saberes entre la comunidad, y lo que aquí se ha investigado: es imperativo llevar a la comunidad las conclusiones técnicas de esta investigación, con el fin

de corroborarlas en la práctica constructiva cotidiana, y dentro de su propio contexto. En primera instancia, para verificar las conclusiones técnicas expuestas en la discusión de resultados del quinto capítulo y analizar qué tan factible es la asimilación de este conocimiento a las prácticas tradicionales. Si estos intercambios resultan positivos el trabajo de investigación resultaría doblemente fructífero: por un lado se habrán obtenido aportaciones en el campo de conocimiento de la disciplina, y por otro, se contribuirá a la solución de uno de los grandes problemas de este país, la vivienda segura para los estratos sociales menos favorecidos. Si esto resulta exitoso, dos maneras de conocer y de aprehender el mundo, aparentemente antagónicas, podrán enriquecerse mutuamente y retroalimentarse.

Como reflexión final, esta experiencia de investigación ha sido una combinación de ciencia, empirismo y cultura, y como se argumenta en el marco teórico, la combinación de las sabidurías tradicionales, el conocimiento aportado por la ciencia y la valoración social de aprendizajes y la incorporación de nuevas posturas combinadas, puede ayudar a encontrar soluciones adecuadas y contextualizadas para vivir de mejor manera y contribuir a encontrar caminos orientados a propuestas sostenibles en el ámbito de la arquitectura.



## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Abbagnano, N. (1963). *Diccionario de filosofía*. México: Fondo de Cultura Económica.

Agrawal, A. (1995). Indigenous and scientific knowledge: some critical coments. *Development and change, (Rotterdam)* (26) 3. 413-439

AlSayyad, N. y Arboleda, G. (2011). The sustainable indigenous vernacular: Interrogating a myth. *Aesthetics of sustainable architecture*. Rotterdam: 010 publishers. 134-151.

Anderson, S. (2005). "The vernacular, memory and architecture", en *Vernacular Modernism: Heimat, globalization and the built environment*, Maiken Umbach y Bernd Hüppauf, editores. Stanford, California EE.UU: Stanford University Press,. 157-171.

Arboleda, G. (2008). The 'Architecturally noble savage' on the sustainable nature of indigenous building. *Traditional Dwellings and Settlements. Working paper series*. 216. 68-89

Ascencio López, O. (2009). *La transformación y evolución de la vivienda vernácula en la costa Grande del Estado de Guerrero* (tesis doctoral, UNAM). Disponible en la base de datos TESIUNAM, EBSCOhost.

AASHTO T 106M/T 106 (2018). Standard Method of Test for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar (Using 50-mm or 2-in. Cube Specimens). USA: American Association of State Highway and Transportation Officials.

ASTM C39 (2018). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. USA: ASTM International, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM C109 / C109M-16<sup>a</sup> (2016). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), USA: ASTM International, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM C141 / C141M-14 (2014). Standard Specification for Hydrated Hydraulic Lime for Structural Purposes. USA:ASTM International, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM C593-06 (2011). Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime for Soil Stabilization. USA:ASTM International, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM D2487-11 (2011). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). USA:ASTM International, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM D-6276 (2019). Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization. USA: ASTM International, [www.astm.org](http://www.astm.org)

- Barba Pingarrón, L. y Villaseñor Alonso, I. (Eds.). (2013). *La cal. Historia, propiedades y usos*. México: Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Barkin, D., Fuente, M., y Rosas, M. (2009). Tradición e innovación: Aportaciones campesinas en la orientación de la innovación tecnológica para forjar sustentabilidad. *Trayectorias*, (11) 29. 39-54.
- Barkin, D., (2012). Hacia un Nuevo Paradigma Social. *Polis* (Santiago), (33), 41. doi:10.4067/S0718-65682012000300003
- Boada, M. y Toledo, V. M. (2003). *El planeta, nuestro cuerpo. La ecología, el ambientalismo y la crisis de la modernidad*. México: FCE, SEP, CONACYT, colección La ciencia para todos, no. 194.
- Boege Schmidt, E. [et al.] (2008). *El patrimonio biocultural de los pueblos indígenas de México. Hacia la conservación in situ de la biodiversidad y agrobiodiversidad en los territorios indígenas*. México: Instituto Nacional de Antropología e Historia: Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas.
- Callenbach, E. (1999). *La Ecología. Guía de bolsillo*. México: Siglo XXI editores.
- Capra, F. (1998). *La trama de la vida: Una nueva perspectiva de los sistemas vivos*. Barcelona: Editorial Anagrama.
- Capra, F. (2003). *Sabiduría insólita, conversaciones con personajes notables*. Barcelona: Editorial Kairós.
- Capra, F. y Luisi, P.L. (2014). *The Systems view of life: A unifying vision*. Cambridge UK: Cambridge University Press.
- Cervantes Cruz, A., García Cook, A., y Limón Rivera, V. (2014). *Tepeyahualco: identidad de un pueblo*. Puebla: Secretaría de Educación Pública/ Consejo Nacional para la Cultura y las Artes.
- Coch Roura, E. y Serra Florensa, R. (1995). *Arquitectura y energía natural*. Barcelona: Edicions UPC.
- Corominas, J. y Pascual, J. A. (2008). *Breve diccionario etimológico de la lengua castellana*. Madrid: Gredos.
- Correia, M., Dipasquale, L., y Mecca, S. (2014). *Versus: heritage for Tomorrow, vernacular knowledge for sustainable architecture*. Florencia: Firenze University Press.
- Correia, M., Carlos, G., y Rocha, S., (Eds.) (2014). *Vernacular Heritage and Earthen Architecture : Contributions for Sustainable Development*. Proceedings of CIAV 2013 | 7<sup>o</sup>ATP | VerSus. London (UK): CRC Press / Balkema / Taylor & Francis Group.
- Crouch, D. y Johnson, J. (2001). *Traditions in architecture: Africa, America, Asia and Oceania*. Nueva York: Oxford University Press.
- DRAE, Diccionario de la Real Academia Española (recurso electrónico), última enmienda (2012)

- Encuentro de Arquitectura Vernácula en Cuba (1999). Mexico: PHES Servicios Editoriales.
- Fernández, C. (1982). *Mejoramiento y estabilización de suelos*. México: Ed. Limusa.
- Fathy, H. (1986). *Natural energy and vernacular architecture: Principles and examples with reference to hot arid climates*. Chicago : University of Chicago Press.
- Flores Camarillo, J.P., (2011). *Desaparición de la arquitectura vernácula: afectación al patrimonio histórico arquitectónico* (tesis de maestría, UNAM). Disponible en la base de datos TESIUNAM, EBSCOhost.
- Fontaine, L. y Anger, R. (2009). *Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture*. Francia: Éditions Belin/Cité des sciences et de l'industrie.
- Foro Tlacotalpan: memorias, 1999. (1999). [Lugar de publicación no identificado]:Arquitectura Vernácula y Patrimonio, 1999.
- Frey, P. A., y Bouchain, P. (2010). *Learning from vernacular / Pierre Frey ; [texts, Patrick Bouchain ... et al.]*. Arles: Actes Sud.
- Fuentes Gutiérrez, A., Masera Cerutti, O., y Ortiz Moreno, J. (2014). *La ecotecnología en México*. México: Unidad de Ecotecnologías del Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Universidad Nacional Autónoma de México.
- García Cook, A. (2014). Cantona. En Cervantes Cruz, A., García Cook, A., y Limón Rivera, V. *Tepeyahualco, identidad de un pueblo*. Puebla: Secretaría de Educación Pública/Consejo Nacional para la Cultura y las Artes. Pp. 13-15.
- García Martínez, B. (2001). "La Ruta de Cortés y otras rutas de Cortés". En Revista de Arqueología Mexicana, Vo. IX núm. 49. pp. 32-35
- Girardet, H. (2007). *Creating sustainable cities*. Schumacher briefings, vol. 2. Dartington Totnes, UK: Green Books.
- Guerrero Baca, L. (1994). *Arquitectura de tierra en México*. México: UAM Azcapotzalco, División de Ciencias y Artes para el Diseño.
- Guerrero Baca, L. (2007). Arquitectura en tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva. *Apuntes, Revista de la Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá)*, 20 (2) 182-201.
- Guerrero Baca, L. Soria, J. y García, B. (2010). La cal en el diseño y conservación de la arquitectura de tierra. *La arquitectura construida en tierra, tradición e innovación. Congresos de arquitectura de tierra en Cuenca de Campos 2004/2009*. Valladolid: Cátedra Juan de Villanueva. Universidad de Valladolid. 177-186
- Guerrero Baca, L. (2011). Pasado y porvenir de la arquitectura de tapia. *Bitácora Arquitectura*. (22). 6-13

- Guerrero Baca, L. y Soria López, F. (2014). Estabilización de suelos con cal y puzolana. Construcción con tierra 6. Publicación periódica del Centro de Investigación Hábitat y Energía, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires. 15-24
- Guerrero Baca, L., Roux Gutiérrez, R., y Soria, F. (2014). Edificación de muros de tierra vertida estabilizados con cal y puzolanas. *Arquitectura de Tierra: patrimonio y sustentabilidad en regiones sísmicas*. San Salvador: 14 seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra. 192-197
- Gutkind, E. A. (1946). *Revolution of environment*. London : K. Paul.
- Guillaud, H., Moriset, S., Sánchez Muñoz, N., Sevillano Gutiérrez, E. (Eds.) (2014). *VERSUS: Lessons from Vernacular Heritage to Sustainable Architecture*. Booklet. Grenoble (France): ENSAG-CRAterre.
- Guillaud, H. (2014). "Defining vernacular architecture". En Correia, M., Dipasquale, L., y Mecca, S. (2014). *Versus: heritage for Tomorrow, vernacular knowledge for sustainable architecture*. Florencia: Firenze University Press.
- Houben, H. y Guillaud, H (1989). *Earth Construction, a comprehensive guide*. India: Practical action publishing.
- Hodder, J. (Ed). (1978). *The spatial organization of culture*. Londres: Duckworth.
- Hoffmann, M.; Minto, F.; Heise, A. (2011). *Tapia*. En Neves, C. y Faria, O. (Coord.), *Técnicas de construcción con tierra*. Bauru, SP. Brasil: FEB-UNESP/PROTERRA, p.46-61.
- Jiménez Vicario, P. y Cirera Tortosa, A. (2014). Arquitectura vernácula: entre lo local y lo global. *Anuario Jóvenes Investigadores*, 2014(1), 120-122.
- Levi-Strauss, C. (2006). *El pensamiento Salvaje*, México: Fondo de Cultura Económica.
- López Morales, F. J. (1987). *Arquitectura vernácula en México*. México : Editorial Trillas.
- Mileto, C., Vegas, F., García Soriano, L. y Cristini, V. (Eds). (2015). *Vernacular Architecture: Towards a Sustainable Future*. Londres: Taylor & Francis Group.
- Mileto, C., Vegas, F., García Soriano, L. y Cristini, V. (Eds.) (2015). *Earthen Architecture: Past, Present and Future*. Proceedings of VerSus 2014 | 2º MEDITERRA | 2º ResTAPIA. London (UK): CRC Press / Balkema / Taylor & Francis Group.
- Minke, G. (2005). *Manual de construcción en tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual*. Uruguay: Editorial Fin de siglo.

- Muñoz Espejo, F. (2006). "Camino Real de Veracruz-México. Por las veredas de la historia". En Revista patrimonio cultural y turismo 15- Cuadernos. Coordinación Nacional de Patrimonio y Turismo, CONACULTA. México: 2006. Pp. 210-223.
- Neves, Célia Maria Martins; FARIA, Obede Borges; RONDONARO, Rodolfo; CEVALLOS, Patricio S.; HOFFMANN, Márcio Vieira. (2009). Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra – prácticas de campo. Disponible en <http://www.redproterra.org>.
- NMX-C-003-ONNCCE (2015). Industria de la construcción- Cal hidratada. Especificaciones y métodos de ensayo. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-036-ONNCCE (2013). Industria de la construcción-mampostería-resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines -método de ensayo. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-037-ONNCCE (2013). Industria de la construcción-mampostería-Determinación de la absorción total y la absorción inicial de agua en bloques, tabiques o ladrillos y tabicones -método de ensayo. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-508-ONNCCE (2015). Industria de la construcción-Bloques de tierra comprimida estabilizados con cal. Especificaciones y métodos de ensayo. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-513-ONNCCE (2015). Industria de la construcción-Cal viva. Especificaciones y métodos de ensayo. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- Nora, P. (1989). "Between Memory and History: Les Lieux de Mémoire", en *Representations*, no.26, número especial: Memory and counter-memory 13-14. [http://www.jstor.org/sici?sici=07346018%28198921%290%3A26%3C7%3AB\\_MAHLL%3E2.0.CO%3B2-N](http://www.jstor.org/sici?sici=07346018%28198921%290%3A26%3C7%3AB_MAHLL%3E2.0.CO%3B2-N), fecha de consulta: 30 de julio de 2017.
- Norberg-Schulz, C. (1980). *Towards a phenomenology in architecture*. Nueva York: Rizzoli.
- Norma E.080, (2017). Diseño y construcción con tierra reforzada. Normas legales. Perú: Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento. Anexo - resolución ministerial nº 121-2017-vivienda.
- Oliver, P., ed. (1997). *Encyclopedia of Vernacular Architecture of the World*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Oliver, P. (2006). *Built to Meet Needs: Cultural Issues in Vernacular Architecture*. Amsterdam: Routledge.
- Pallasmaa, J. (2012). *La mano que piensa: Sabiduría existencial y corporal en la arquitectura*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili.

- Pastor, M. (2017). *La construcción con tierra en arqueología*. Alicante, España: Universitat d'Alicant
- Peña, E. (Coord.) (2008). *Informe de resultados de la investigación del sistema constructivo Adobe sismo-resistente*. Proyecto de investigación técnica "Mejoramiento de la tecnología para la construcción y difusión de la vivienda popular sismo-resistente". El Salvador: JICA, CENAPRED, FUNDASAL, Viceministerio de vivienda y desarrollo urbano de El Salvador, Universidad centroamericana "José Simeón Cañas", Universidad de El Salvador.
- Prieto, V., y Trueblood, B. (1994). *Vivienda campesina en México*. México: Studio Beatrice Trueblood, Secretaría de Turismo, SEDESOL, INFONAVIT.
- Prieto, V. (2006). *Proyecto de recuperación de la arquitectura vernácula e impulso al desarrollo integral de la comunidad indígena de San Antonio Tierras Blancas, Municipio de Los Reyes, Michoacán*. Morelia, México : Secretaría de Cultura.
- Rapoport, A. (1972). *Vivienda y cultura*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili.
- Rapoport, A. (2003). *Cultura, arquitectura y diseño*. Barcelona: Edicions UPC.
- Rodríguez Licea, M., (2014). *El uso de tapia en las haciendas de Tlaxacala: un sistema constructivo alternativo para la arquitectura del presente*. (Tesis doctoral, UNAM). Disponible en la base de datos TESIUNAM, EBSCOhost.
- Rodriguez-Navarro, C.; Hansen, E.; Ginell, W. (1998). Calcium hydroxide crystal evolution upon aging of lime putty. *Journal of the American Ceramic Society*, 81 [11] 3032–3034.
- Rudofsky, B. (1964). *Architecture without architects: An introduction to non-pedigreed architecture*. Nueva York: Doubleday & company.
- Sámano, M. (2018). *Diseño, elaboración y evaluación de morteros de cal aérea "formulada". Perspectivas para la restauración sostenible de bienes culturales inmuebles*. (Tesis de maestría, Escuela Nacional de conservación, restauración y museografía, INAH).
- Sepulcre, A. (2005). *Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fábricas de interés histórico-artístico*. (Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la universidad Politécnica de Madrid). Disponible en [http://oa.upm.es/264/1/Alberto\\_Sepulcre.pdf](http://oa.upm.es/264/1/Alberto_Sepulcre.pdf)
- Sepúlveda Pérez, L.A. (2006). *Arquitectura vernácula y desarrollo*. Tesis de maestría, UNAM). Disponible en la base de datos TESIUNAM, EBSCOhost.
- Soria Santamaría, F. (1983). "Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción". En *Materiales de Construcción* no. 190-191. España: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. pp. 69-84.

- Toledo, V. M., y Barrera Bassols, N. (2008). *La memoria biocultural: la importancia ecológica de las sabidurías tradicionales*. Barcelona: Icaria.
- Toledo V.M. y Ortíz, B. (2014). *México, regiones que caminan hacia la sustentabilidad. Una geopolítica de las resistencias bioculturales*. México: Universidad Iberoamericana Puebla.
- Toledo, V. M. (2005). "La memoria tradicional: la importancia agroecológica de los saberes locales", LEISA Revista de Agroecología 20, 16-19.
- Tovar, R. (2016). *La Cal. Ciencia, tecnología y arte*. México: Editorial Trillas.
- Vargas, D., Zárate, P., Gutiérrez, H. (2005). "Actividad puzolánica de las tobas pumíticas de la zona metropolitana de Guadalajara". En e-Gnosis, revista digital científica y tecnológica de la Universidad de Guadalajara. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=73000309>. Fecha de consulta: Febrero 2019
- Vellinga, M. (2015). "Vernacular architecture and sustainability: Two or three lessons..." En Miletto, Vegas, García Soriano y Cristini (Eds.) (2015). *Vernacular Architecture: Towards a sustainable future*. Londres: Taylor & Francis Group
- Villoro, L. (1982). *Creer, saber, conocer*. México: siglo XXI editores.
- Vizcarra, A. (comp.) (2017). *Naturaleza en el habitar 01. Tradiciones constructivas en madera y fibras naturales*. México: Facultad de Arquitectura, UNAM.

Zeihner, L. (1996). *The ecology of architecture: a complete guide to creating the environmentally conscious building*. Nueva York: Watson-Guption publications.

## Otras fuentes de consulta

Páginas web:

- Base de datos en la red sobre arquitectura indígenas y vernaculares. Trabajo de investigación promovido por Gabriel Arboleda, del programa de Doctorado en Arquitectura de la Universidad de California, Berkeley <http://www.etnoarquitectura.org>
- Comisión Nacional para el Desarrollo de los pueblos indígenas [http://www.cdi.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=frontpage&Itemid=1](http://www.cdi.gob.mx/index.php?option=com_content&view=frontpage&Itemid=1)
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social <http://www.coneval.gob.mx/Paginas/principal.aspx>
- ICOMOS (1999). *Carta del patrimonio vernáculo construido*. [http://www.international.icomos.org/charters/vernacular\\_sp.pdf](http://www.international.icomos.org/charters/vernacular_sp.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática <http://www.inegi.org.mx/>
- International Committee of Vernacular Architecture. ICOMOS <http://ciav.icomos.org>

Laboratorio de procedimientos y sistemas constructivos tradicionales, Facultad de Arquitectura, UNAM. <https://arquitectura.unam.mx/procedimientos-y-sistemas-constructivos.html>

Organización de las Naciones Unidas (ONU). Informe Brundtland <https://es.scribd.com/doc/105305734/ONU-Informe-Brundtland-Ago-1987-Informe-de-la-Comision-Mundial-sobre-Medio-Ambiente-y-Desarrollo>

Proyecto VerSus Vernacular Heritage for sustainable Architecture <http://www.esg.pt/versus/>

Red Iberoamericana Proterra <http://redproterra.org/index.php>

Registro Agrario Nacional <http://www.ran.gob.mx/ran/index.php>

Secretaría de Desarrollo Social [http://www.sedesol.gob.mx/es/SEDESOL/Programas\\_Sociales](http://www.sedesol.gob.mx/es/SEDESOL/Programas_Sociales)

Worldwatch Insittute. Vision for a sustainable world. <http://www.worldwatch.org/>

[World Heritage Earthen Architecture Programme \(WHEAP\) UNESCO http://whc.unesco.org/en/earthen-architecture/](http://whc.unesco.org/en/earthen-architecture/)

Cultures constructives et développement durable CRAterre <http://craterre.org/>

Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21170a.html>

