

# CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE MATERIALES DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EN TIERRA: EL ADOBE

Juan Carlos Rivera Torres <sup>1</sup> y Edgar Eduardo Muñoz Díaz <sup>2</sup>

**Resumen:** En este artículo se presentan los aspectos que caracterizan los sistemas constructivos en tierra cruda, particularmente en adobe, presentes en bienes inmuebles de interés cultural colombianos, específicamente en capillas y templos doctrineros. Mediante el estudio de un caso específico (capilla doctrinera de Tausa – Cundinamarca), se exponen los resultados obtenidos de las propiedades de los adobes, de orden físico, mecánico y químico, las cuales son imprescindibles para el conocimiento del adobe como material estructural y su correspondiente evaluación sismo-resistente. La caracterización del material tuvo inicialmente una fase experimental sobre probetas de adobe patrimonial (del orden de 300 años). Posteriormente se hizo una evaluación analítica y se compararon los resultados obtenidos con los de otros investigadores, tanto en Colombia como en el resto de Latinoamérica. Finalmente, se desarrolló una guía metodológica y una ficha de caracterización que se espera sean útiles para futuros estudios de los sistemas constructivos estructurales y sismo resistentes de las edificaciones de valor e interés patrimonial.

Para los sistemas constructivos en tierra cruda, adobe y otras modalidades, presentes en bienes de interés cultural, particularmente en arquitectura religiosa (capillas y templos doctrineros), es imprescindible el estudio de procedimientos de rehabilitación con técnicas y materiales que mejoren las condiciones de su comportamiento estructural ante los efectos de la actividad sísmica y el deterioro natural.

**Palabras Claves:** adobe, bien inmueble de interés cultural, capillas doctrineras, material estructural, resistencia sísmica, tierra cruda.

## STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF MATERIALS USED IN CONSTRUCTION SYSTEMS WITH SOIL MATERIAL: THE ADOBE

**Abstract:** This article discusses same the aspects that characterize construction systems with raw soil, particular adobe, present in Colombian buildings of cultural interest, specifically chapels and churches. The physical, mechanical, and chemical properties of adobe, obtained for a specific case (Capilla doctrinera in Tausa, Cundinamarca) are described. These properties are of paramount importance when studying adobe as a structural material and its performance during earthquakes. The characterization of the material was made in two stages. First, representative samples of adobes, about 300 years old, were taken and tested. The second stage was to analyze the results and compare them with available data from studies in Colombia and other Latin America countries. Finally, a guide with the methodology and characterization cards were prepared that are expected to be useful in future studies of the construction methods, structural systems, and seismic performance of buildings with historical value.

For buildings of historical value such as those chapels and churches called “doctrineras”, made with raw soil, adobe and similar materials, it is very important to study strengthening methods with techniques and materials that improve their structural behavior when subjected to earthquakes and natural deterioration.

**Keywords:** adobe, cultural interest properties, churches, raw soil, seismic resistance, structural material.

<sup>1</sup> Estudiante de magíster en restauración de monumentos arquitectónicos, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. E-mail: [juancarlos.riveratorres@gmail.com](mailto:juancarlos.riveratorres@gmail.com).

<sup>2</sup> Profesor, Pontificia Universidad Javeriana, Carrera 7 No 40 – 62, Bogotá, Colombia. E-mail: [edgar.munoz@javeriana.edu.co](mailto:edgar.munoz@javeriana.edu.co).

## INTRODUCCIÓN

El estudio y conocimiento de los sistemas constructivos, especificación de los materiales y su aplicación en la formulación de soluciones para la rehabilitación de bienes de interés cultural (BIC) o inmuebles con carácter histórico, se viene realizando en Colombia basado solamente en inspecciones visuales y análisis cualitativos, sin profundizar en análisis cuantitativos que permitieran tener mayor conocimiento sobre sus propiedades y leyes constitutivas. A través del conocimiento detallado de las propiedades físicas de este material, se pueden realizar modelos estructurales en elementos finitos (discretos, continuos, lineales y no lineales) para las labores de diagnóstico, que conduzcan a la formulación de acciones de rehabilitación de estos sistemas constructivos.

Los sistemas estructurales presentes en edificaciones patrimoniales equivalen a los sistemas constructivos tradicionales de mampostería en diversos materiales. Los materiales estructurales usados en la arquitectura religiosa, militar y civil del patrimonio construido corresponden a piedra natural y artificial (en la que se cuenta la tierra cruda – adobe y tapia pisada), mortero y madera.

La tierra “cruda” como material estructural, es la materia prima de la obra de fábrica o mampostería de centenares de templos, claustros, edificios civiles y militares, así como de numerosos ejemplares de arquitectura doméstica. La procedencia del material en cada caso está directamente relacionada con su emplazamiento (territorio) y la implantación del edificio en cuestión.

Lo anterior justifica el trabajo de investigación que se expone en el presente documento y que profundiza en el estudio y determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la tierra como material estructural. Igualmente, se hace un estudio de sus componentes químicos, los que afectan al comportamiento estructural del sistema constructivo. Se estudian de la tierra, los aspectos que permiten comprender su naturaleza estructural y percibir cuáles son los factores que influyen en el comportamiento estructural de ésta.

## ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

El estudio e investigación de la arquitectura en tierra es importante para Colombia por el número de bienes de interés cultural (Ojeda, 2003) distribuidos en toda la extensión del territorio nacional. En el caso de los edificios que hoy son parte del catálogo del patrimonio material de Colombia, por lo menos aquellos construidos antes de mediados del siglo XVIII, fueron edificados con cualquiera de las técnicas conocidas como de tierra “cruda”; algunas de las cuales lograron superar estos períodos y se continuaron utilizando hasta entrado el siglo XIX. Para la presente investigación se empleó como antecedentes, los estudios y trabajos realizados en Latinoamérica, especialmente en México, Perú, Bolivia y Argentina. En ellos se exponen estudios de construcciones en tierra de arquitectura contextual moderna y contemporánea. Sin embargo se encontraron pocos trabajos relacionados con bienes de interés cultural y monumentos arquitectónicos.

## SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EN TIERRA

Los sistemas constructivos en tierra de edificaciones patrimoniales consisten principalmente en muros de carga; se diseñaron para soportar cargas verticales (peso propio, entrepisos, cubiertas y otros) y de servicio (carga viva), sin incluir los efectos producidos por sismo. Se asimila entonces a un sistema de mampostería compuesto por unidades de tierra cruda, aparejadas de diferentes formas, con la cual se construyen muros que varían en espesor y en altura; los cuales se trapan o no.

Los “templos doctrineros” tienen una configuración y geometría particular dentro de los diferentes bienes inmuebles de interés cultural que posee el país. La valoración de los inmuebles existentes se hizo sobre el inventario detallado de estos bienes en el área andina Colombiana (Departamentos de Boyacá, Cundinamarca y Santander). En la Tabla 1 se definen los materiales básicos de cada sistema constructivo presente en el inmueble.

La conformación constructiva en general de los “templos doctrineros”, está marcada por los siguientes parámetros, los que se describen gráficamente en la Figura 1:

- Cimientos corridos tipo ciclópeo, construidos en conglomerado de roca nativa y pega en argamasa o barro compacto. Sobre éstos se apoyan los muros de carga. Sus magnitudes son variables en función del tipo de suelo sobre el que se apoyan (esto para su profundidad) y generalmente con un sobre ancho al de los muros que soportan.

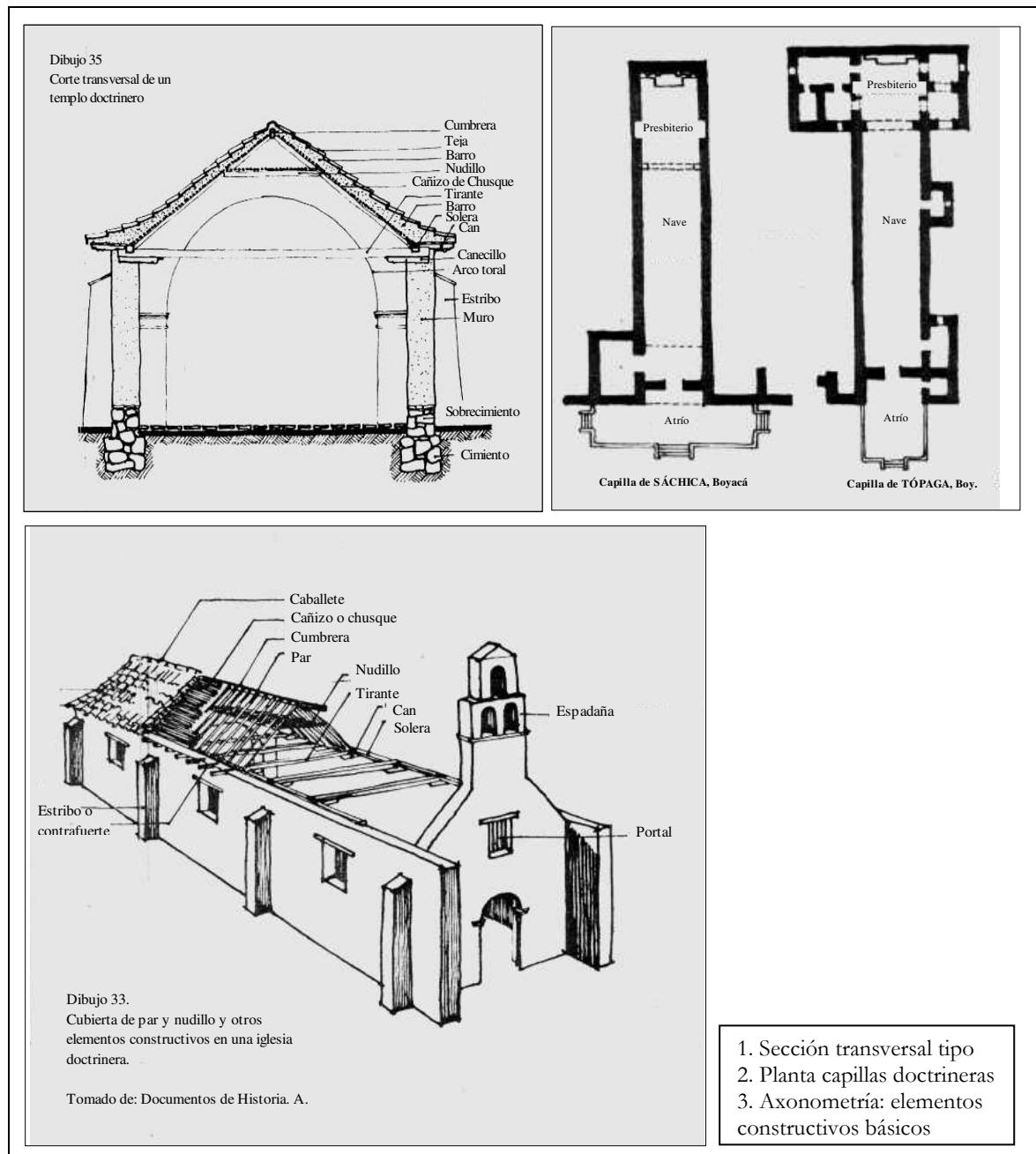
- Muros cargueros longitudinales de espesores variable entre 0.90 y 1.20 metros; altura de aproximadamente 2 a 2½ pisos, es decir entre 5 y 7 metros. Además, existen aperturas ocasionales para vanos de puertas y ventanas. Para impedir el volteo hacia el exterior, estos muros longitudinales trabajan en conjunto con contrafuertes, ubicados a cuartas o quintas luces de la longitud del elemento, es decir separados entre 3 y 4 metros. Estos muros generalmente reciben las cargas de cubierta, trasmitidas a éstos mediante el apoyo de los tirantes y demás estructura de armar a una viga solera que se ubica sobre el cabezal del muro.
- El muro testero o tapa anterior de la capilla, aquel que forma el ábside y que cierra el edificio delante del presbiterio se encuentra construido de lado a lado, es decir sin aperturas o vanos y vinculando los dos costados longitudinales.
- El frontón de fachada en la mayoría de los casos está construido en sillares de roca natural rústica y/o mampostería en unidades de arcilla cocida y se empalman con una traba irregular a los muros longitudinales.
- Marcando la importancia del presbiterio, entre éste y la nave del templo se presenta el arco toral que se dispone perpendicularmente a los muros longitudinales y que generalmente se acompaña de respectivos contrafuertes al exterior.
- Finalmente, se afianza todo el sistema con el entramado de cubierta, conformado generalmente por una trama de madera en par y nudillo (una de las técnicas de armadura más comunes) y que constituye la forma estructural más sencilla para salvar la luz transversal de la única nave de la capilla. Como función adicional a la de cobertura, la estructura de madera y su manto (teja, barro, esterilla, etc.) tienen la función de estabilizar el sistema de muros, así como de proteger al material básico del sistema estructural, la tierra cruda –el adobe.

**Tabla 1: Monumentos de arquitectura religiosa - materiales básicos del sistema constructivo.**

COLOMBIA - IGLESIAS MONUMENTOS NACIONALES - Región Andina / Materiales básicos del sistema constructivo						
Departamento Ciudad / Municipio	Nombre	Materiales Básicos del Sistema Constructivo				
		Muros	Pañetes	Piso	Cubierta	Observaciones
BOYACÁ	Betéitiva	Capilla doctrinera	Tapia	Cal/arena	Tableta gres	Par y nudillo/Teja Barro
	Chíquiza	Capilla doctrinera	Adobe	Cal/arena- Cemento/arena	Arcilla cocida y piedra	Par y nudillo/Teja Barro
	Chivatá	Capilla doctrinera Toca	Mixta: Tapia	Cal/arena	Tablón ceramico	Par y nudillo/Teja Barro
	Cucaita	Capilla doctrinera		Cal/arena-Cemento/arena	Tablón arcilla	Par y nudillo/Teja Barro
	Monguí	Capilla de San Antonio				Sismo 1995
	Sáchica	Capilla doctrinera	Tapia	Cal/arena	Tableta gres	Par y nudillo/Teja Barro
	Socha	Iglesia de Socha viejo	Tapia pisada	Cal/arena		Par y nudillo/ Teja Barro
	Tópaga	Capilla doctrinera				Capilla posa, muy intervenida
	Turmequé	Capilla de los Dolores	Piedras y rafas de ladrillo	Cal/arena	Baldosín cemento	Par y nudillo/Teja Barro
CUNDINAMARCA	Guasca	Capilla de Siecha	Adobe	Cal y arena	Tablón arcilla	Par y nudillo/ Teja Barro
	Sopó	Iglesia y Casa curia Divino Salvador	Fachada: Piedra	Cal/arena	Tablón Gres	Par y nudillo/ Teja Barro
	Suesca	Capilla doctrinera y plaza	Mixta: Adobe	Cal/arena	Tablón arcilla	Par y nudillo/ Teja Barro
	Sutatausa	Iglesia colonial, plaza y capillas pozas	Adobe	Cal/arena	Tablón arcilla	Par y nudillo/ Teja Barro
	Tenjo	Capilla doctrinera	Adobe	Cal/arena	Tablón arcilla	Par y nudillo/ Teja Barro
	Bogotá	Capilla de la Bordadita	Piedra/Tapia	Cal/arena- Cemento/arena		Madera/Teja barro
		Capilla del Sagrario	Piedra			Madera/Teja barro
		Iglesia de la Concepción		Tapia/ladrillo, piedra		Madera/Teja barro
		Iglesia de San Agustín	Mixta: tapia, piedra, ladrillo	Cal/arena- Cemento/arena	Baldosa	Madera/Teja barro
SANTANDER		Iglesia de San Francisco	Mixta:piedra, ladrillo	Cal/arena- Cemento/arena		Madera/Teja barro
		Iglesia de San Ignacio	Cal/arena- Cemento/arena	Baldosa arcilla	Madera/Teja barro	
		Iglesia de Santa Barbara	Mixta: adobe, ladrillo			
		Iglesia de Santa Clara	Mixta: piedra, ladrillo			
	Ocaña	Templo de San Francisco	Mixta: tapia, piedra, ladrillo	Cal/arena- Cemento/arena	Tablón de arcilla / madera	Pañete sostenida con tresbolillo
	Pamplona	Templo San Juan de Dios	Mixta: adobe, piedra, ladrillo		Adoquin	Madera/Teja de barro
	Barichara	Capilla Jesús Nazareno	Mixta: Piedra/tapia(sacristía)		Ladrillo cuarteron	Par y nudillo/Teja barro
		Iglesia Santa Barbara	Mixta: Piedra,tapia(primer)	Cal/arena	Baldosa de barro	Par y nudillo/Teja barro
	Bucaramanga	Iglesia de San Antonio	Mixta: Adobe,piedra, ladrillo	Cal/arena		Par y nudillo/Teja barro
		Capilla de los dolores	Mixta: Adobe,tapia,piedra			Cimientos: piedra.
	Confines	Iglesia de San Cayetano	Mixta: Piedra, Ladrillo, baharequ	Sin pañetes, capitel con cal	Baldosín cemento	Par y nudillo/ Teja barro
	Girón	Capilla de las Nieves	Mixta: Adobe,tapia	Barro y boñiga	Baldosín de cemento	Madera/Teja barro
	Socorro	Nuestra señora del Socorro	Mixta: Adobes, piedra, ladrillo	Cal/arena	Baldosín de cemento	Madera/Teja de barro
						Tipología doctrinera, muy intervenida

Es usual que en los sistemas constructivos de los edificios en tierra se encuentren mezclas de diferentes tipos de mampostería: mampuestos en sillares de piedra y/o tapias y/o muros en adobe. No obstante, el presente trabajo se refiere solamente al conocimiento y caracterización del adobe, por encontrarlo como el elemento de mampostería en tierra con mejor “calidad de factura”. Se ha observado que la tapia (tapias) presenta mayor gama y amplitud en cuanto al tipo de materiales empleados y su degradación es severa debido al funcionamiento estructural y los agentes externos, como por ejemplo el intemperismo al que generalmente están sometidos. De los 1039 monumentos declarados como Monumentos Nacionales, 158 corresponden a arquitectura religiosa –claustros, conventos, catedrales, iglesias, capillas, templos y ermitas, es decir poco más de un 15%, lo que indica la importancia que tiene la arquitectura religiosa en el ámbito cultural y patrimonial. De éstas, una tercera parte (52 edificios), corresponden a capillas, lo que indica la relevancia del material de estudio.

En general un material estructural tiene definidas sus propiedades por todas aquellas características que permiten el conocimiento de su comportamiento ante solicitudes. Es relevante que a lo largo de decenios, los mismos materiales que adelante se refieren son los que han permanecido como materiales estructurales y solamente el adelanto y modificación de técnicas en su utilización han logrado la optimización en su empleo. Estos materiales son: la tierra, la piedra, la madera y los metales. No así lo es la gran cantidad de aplicaciones y combinaciones constructivas que el constructor ha logrado crear para solucionar los diversos rigores técnicos a que se ha enfrentado por siempre. Por tanto, esa gran cantidad de opciones desarrolladas proporciona una gradación muy amplia en los valores de las propiedades de los materiales y soluciones estructurales que se han producido.



**Figura 1: Conformación típica de una capilla doctrinera.**

Toda edificación construida tiene inmersa en si misma la necesidad de garantizar su permanencia en el espacio y en el tiempo; esta condición depende de la capacidad de los materiales estructurales, de la forma como éstos están empleados y de la afectación medio ambiental a que se vean sometidos. Por lo tanto, se concluye que la durabilidad de cualquier estructura estará siempre vinculada con algunos aspectos que le inciden directamente:

- La evolución y transformación del entorno de la estructura.
- El cambio de fase de los materiales que constituyen el sistema constructivo y estructural.

### La tierra cruda como material estructural: El adobe

El sistema constructivo en tierra cruda, denominado de muros en adobe, está formado básicamente por el aparejado de unidades de tierra cruda secadas al sol (adobes), aglutinados con barro que hace las veces de mortero de pega. Las unidades básicas de este mampuesto son fabricadas y/o moldeadas en diversos formatos y con variadas composiciones granulométricas. En el diagrama de fabricación del adobe (Figura 2) se indican las acciones invariables y cíclicas que se deben llevar a cabo para la fabricación de las unidades de fábrica, las que no han cambiado significativamente si se habla de adobes históricos o modernos. Puesto que la técnica constructiva en sí misma no se ha modificado, lo que si se observa como adelanto y perfeccionamiento en su composición es la adición de elementos orgánicos e inorgánicos, mediante métodos físicos, físico-químicos o químicos, que buscan mejorar las propiedades mecánicas y comportamiento ante acciones externas, principalmente el intemperismo al que se encuentran sometidas en su gran mayoría estas estructuras. En el diagrama de la Figura 2 se pueden advertir todas las variables que entran a jugar en este proceso, las cuales se ven modificadas de un monumento a otro.

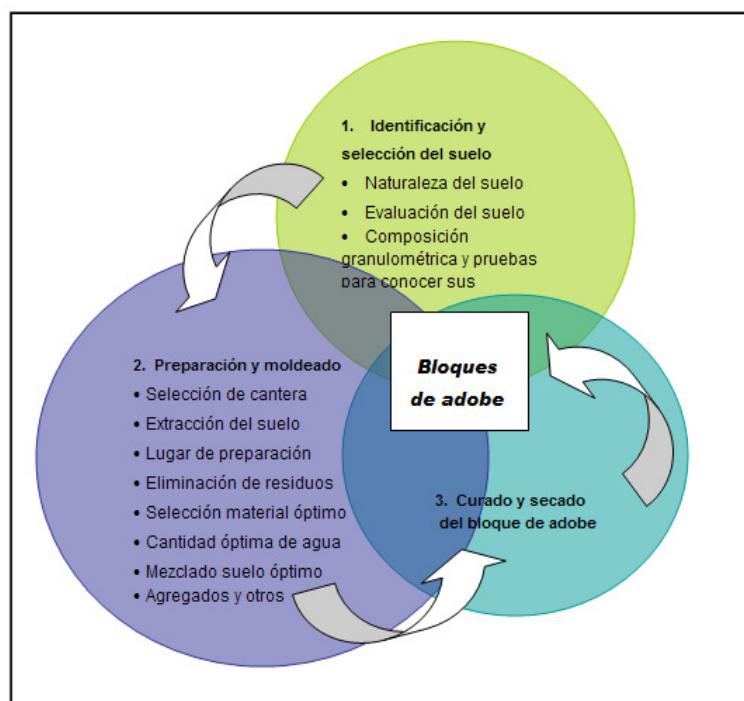


Figura 2: Diagrama del proceso de fabricación del adobe - Unidad básica del mampuesto.

Dada la aparente simplicidad que guarda esta tecnología constructiva, se hace necesario en virtud de ofrecer soluciones de intervención más apropiadas para los bienes de interés cultural que poseen este tipo de material, conocer con mayor exactitud y amplitud las características físicas, mecánicas y químicas del material que lo componen. Para caracterizar en su integridad el material que compone tanto la unidad de mampostería como la obra de fábrica que con éstos se ha edificado, se revisan tres aspectos principales que incluyen las características predominantes en los materiales empleados en ingeniería: físicas, mecánicas y químicas.

### FASE EXPERIMENTAL

En esta etapa de la investigación se agrupan los siguientes aspectos: la selección del caso de estudio, la toma de muestras y elección de probetas, y el proceso independizado de ejecución de los distintos ensayos que caracterizan el material de tierra en el bien de interés cultural elegido. Igualmente, se enseñan en este artículo dos casos de estudio, diferenciados tanto por el origen, calidad y tipo de caracterización que sobre los especímenes se realizó, como por el sitio de realización de los ensayos correspondientes. El primer caso es el de la capilla doctrinera de Tausa Vieja, y el segundo el del material trasladado a los patios del laboratorio de materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

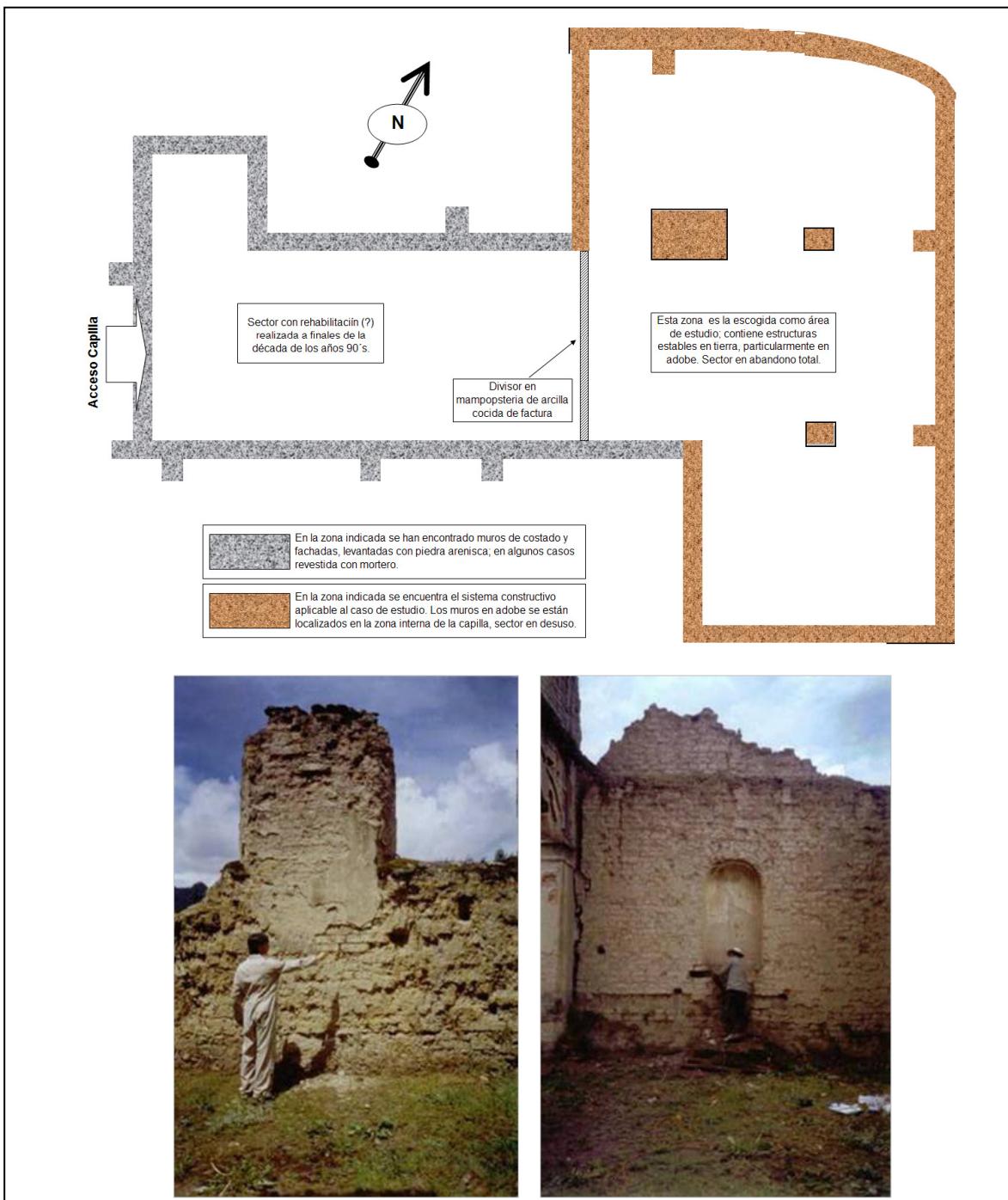
## Caso de estudio: Capilla doctrinera de Tausa Vieja

La capilla doctrinera de Tausa Vieja está localizada en el sector antiguo del municipio de Tausa (Cundinamarca), al cual se llega por la vía que desde Zipaquirá conduce a Ubaté, cerca de una hora de viaje desde Bogotá. La antigua capilla, ubicada sobre un pequeña colina, está dividida en dos sectores claramente diferenciados: el tramo frontero de una sola nave, construida en mampostería de sillares de piedra, adobe y tapia pisada, frontón en mampuesto de arcilla cocida y cubierta en par y nudillo. El sector posterior, el de mayor interés para esta investigación, corresponde a los muros en ruina del sector de presbiterio, muro testero y dos áreas laterales, de las cuales se desconoce su uso. Este sector en avanzado estado de deterioro, presenta la muratura indicada en las Figura 4, correspondientes a la planta general de la capilla y registros fotográficos de abril del 2003. El sistema constructivo del inmueble estudiado corresponde a muros de adobe de masa considerable aún en pie, con las patologías propias de un sistema como éste, expuesto al intemperismo, atenuado por la posición sobre la colina, con cara a la corriente de viento que circula desde el sur oriente del sector donde la capilla se implanta. Para la caracterización física y mecánica se tomaron 32 muestras, de las cuales 27 son de unidades y fragmentos de adobe y 5 de fragmentos de mortero de pega. Para la caracterización química se tomaron 33 muestras; 20 de fragmentos de adobe, 7 de fragmentos de mortero de pega y 6 de fragmentos de mortero de revestimiento sobre muros. Las muestras tomadas para los análisis químicos son muestras de material obtenidas por raspado y/o rotura en el sitio de toma, en una magnitud por peso de aproximadamente 250 a 300 gramos, cantidad equivalente al material que cabe en la palma de una mano. Este material se depositó en bolsas plásticas, se selló herméticamente, se identificó y trasladó al Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Básicas de la Universidad Javeriana. El muestreo para la caracterización física y mecánica se realizó en los fragmentos de adobe y mortero de pega, mediante la extracción de estos materiales en cantidades por peso cercano a los 1000 gramos. Para la consecución de unidades de adobe, el proceso es bastante más dispendioso y elaborado, pues al estar confinado en el muro mediante el mortero de pega, se requirió implementar procedimientos para retirar el mortero que lo confinaba hasta lograr que el adobe quedara suelto. De la experiencia adquirida durante la extracción y obtención de muestras y probetas de unidades y fragmentos de adobe y mortero de pega (ver Figura 3), llama la atención del nivel de vulnerabilidad que se tiene al trabajar con materiales deleznable y frágiles como éstos que son la materia prima del sistema constructivo en estudio.



Figura 3: Capilla doctrinera de Tausa Vieja - Proceso de extracción de unidades de adobe.

**Caracterización física en el laboratorio de suelos y geotecnia:** Los ensayos realizados determinaron las características físicas del adobe y mortero de pega de la capilla doctrinera de Tausa Vieja. Se realizaron ensayos de laboratorio que dan a conocer las principales características físicas: composición granulométrica, peso específico, contenido de materia orgánica, contenido de humedad y límites de consistencia. La Figura 5 muestra algunos aspectos de la etapa de caracterización física para adobes, a través de la ejecución de diversos ensayos. Se entiende que a diferencia del análisis de suelos o de material inalterado, como es el caso de ensayos sobre muestras de material que no han sido aún preparadas, los materiales que se han utilizado en este proceso de caracterización tienen características que los hacen más particulares. Esto se debe a que, por una parte, el material de suelo ya ha sido manipulado, quebrado, separado, mezclado, humedecido, antes de dar forma a los adobes y además se ha mezclado y compactado para moldear estas unidades de mampostería y posteriormente levantar el muro. Y por último, un muro que puede llevar cerca de 150 años o más de haberse construido, tiene una consolidación y un periodo de exposición a agentes externos como ningún otro material.



**Figura 4: Capilla doctrinera de Tausa Vieja: Planta tipo y registros del estado actual.**



**Figura 5: Capilla doctrinera de Tausa Vieja - Caracterización física de adobes y mortero de pega.**

**Caracterización mecánica en el laboratorio de materiales:** Los ensayos de compresión sobre unidades de adobe y fragmentos preparados de mortero de pega y flexión perpendicular al plano horizontal de unidades de adobe fueron realizados en el laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana. Los registros gráficos que se presentan en la Figura 6 exponen algunos apartes de los procesos de ensayos de caracterización mecánica durante la fase experimental. Los ensayos de resistencia mecánica incluyen varias etapas: la selección de la muestra recogida en la etapa de campo, la preparación de la muestra mediante el mejoramiento cuidadoso de las superficies y refrendado de las mismas, y finalmente el ensayo. En esta etapa se prepararon unidades de adobe, seleccionadas del lote recogido en campo y trasladado al laboratorio, y fragmentos representativos de mortero de pega en tierra, correspondiente a la junta horizontal del mampuesto en estudio.



**Figura 6: Caracterización mecánica - Compresión sobre adobes.**

**Caracterización química en el laboratorio:** Para la caracterización química del adobe, del mortero de pega en tierra y del mortero de revestimiento se utilizaron los laboratorios y equipos de medida y análisis del Departamento de Química de la Facultad de Ciencias Básicas de la Pontificia Universidad Javeriana. Las secuencias gráficas que se presentan registran los ensayos de caracterización química, y en éstos, los procesos que se adelantaron durante la fase experimental con los cuales se obtuvieron los parámetros químicos para este sistema constructivo.



**Figura 7: Caracterización Química: Contenido de humedad y del materia orgánica y elementos químicos.**

**Análisis cualitativo y cuantitativo de elementos químicos en muestras de materiales estructurales:** La determinación de cada uno de los elementos químicos existentes en las muestras del material estructural se realizó por medio del método de espectrofotometría por absorción atómica. Para estos análisis fue necesario preparar patrones de dilución de los componentes químicos más usuales en este tipo de materiales estructurales, los cuales son comparados con fracciones igualmente diluidas de cada una de las muestras analizadas (ver Figura 7). Los ensayos de compresión sobre muretes de composición (adobe con mortero de pega), con deformación controlada para la obtención de la curva esfuerzo – deformación, fue realizada en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería (ECI).

#### **Caracterización en la Escuela Colombiana de Ingeniería: Ensayos de compresión sobre muretes de composición adobe con mortero de pega**

Se adoptó el material de adobe utilizado durante la construcción de los muros en escala natural; muros construidos con fines de análisis dinámico. Este material fue fabricado para el grupo GRIME en el municipio de Suesca (Cundinamarca), fue trasladado desde allí hasta los patios del Laboratorio de Materiales de la ECI, donde continuó su fraguado por más de cuatro meses. Aunque el formato de la unidad básica del mampuesto que aquí se utilizó difiere de la unidad básica existente en el caso de estudio anterior, y en general del existente en las edificaciones de carácter patrimonial, se busca tener un mampuesto sobre el cual se pueda obtener información para la construcción de curvas de esfuerzo – deformación, que contribuye a determinar un módulo elástico experimental de la mampostería en adobe (ver Figura 8). Esta constante no se ha encontrado relacionada en estudios de este tipo de material.



**Figura 8: Caracterización mecánica en la ECI: Compresión sobre muretes de adobe.**

Los muretes de prueba se realizaron en formato de tres hiladas de altura, con una unidad de adobe de planta. Tanto las unidades de adobe, como el material del mortero de pega y el espesor del mismo, fueron las mismas que se emplearon en la construcción del muro modelo. Durante la construcción de tres muros modelo se realizaron 14 muretes del formato indicado.

## FASE ANALÍTICA: RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Con la caracterización de los materiales estructurales se da un marco de referencia en cuanto a la calificación y cuantificación de las propiedades más relevantes que de él se pueden deducir. Esta investigación sólo es una fracción del estudio de los materiales y comportamiento estructural de las edificaciones patrimoniales en tierra. Por tanto los resultados aquí registrados, aunque merecen confiabilidad, son una muestra discreta frente a tantos edificios de este carácter que se encuentran distribuidos en todo el territorio colombiano, construidos con materiales y técnicas similares.

**Resultados de la caracterización física:** Las propiedades físicas del adobe y su mortero de pega están referidas en su mayoría a los ensayos realizados en el laboratorio de suelos, y los resultados están agrupados en la Tabla 2. En general se puede destacar de esta etapa de caracterización que:

- El contenido de humedad natural es bajo, posiblemente debido al manejo de las muestras y probetas empleadas en los ensayos.
- El contenido de materia orgánica es moderadamente superior a los datos indicados en fuentes consultadas, y es consistente con el contenido aceptable.
- El análisis de composición granulométrica revela una mayor tendencia a la composición de suelos finos; quedando clasificados los suelos del caso de estudio como CL - Arcillas inorgánicas de baja plasticidad.

Se deduce en general que existe una correspondencia con el amplio rango de valores que se han encontrado en estudios específicos para este material. Sin embargo, se debe tener en cuenta que este trabajo toca sólo a un caso de estudio y no es apropiado generalizar todo un sistema constructivo a partir de los resultados obtenidos.

**Tabla 2: Resultados de caracterización física para adobe en la capilla doctrinera de Tausa Vieja.**

Capilla doctrinera de Tausa Vieja: Caracterización Física			
Característica Física	Resultados promedio obtenidos		
	Adobe (Unidades)	Mortero de pega (Fragmentos)	
Contenido de humedad	3,3%	3,22%	
Contenido de materia orgánica	4,8%	5,49%	
Peso específico	1,77 t/m <sup>3</sup>	1,83 t/m <sup>3</sup>	
pH	5	5,5	
Límites de consistencia	Límite Líquido (LL)	44,0%	32,0%
	Límite Plástico (LP)	25,0%	14,0%
	Índice Plástico (IP)	20,0%	17,0%
Composición granulométrica	Gravas	10,0%	6,0%
	Arenas	18,0%	50,0%
	Finos	72,0%	45,0%
Clasificación del suelo	USC	CL - Arcillas inorgánicas de baja plasticidad	
	AASHTO	Suelo Limo Arcilloso - Grupo A-7	

**Resultados de la caracterización mecánica:** Las propiedades mecánicas de este material estructural están referidas, en su mayoría, a los ensayos realizados en el laboratorio de materiales. Los resultados obtenidos para la etapa de caracterización mecánica de materiales estructurales para el sistema de muros en tierra se enmarcan en el rango de valores que está construido con datos de estudios de diferentes autores. Se observa entonces que la capacidad mecánica de este sistema constructivo es relativamente baja.

- Los ensayos de compresión simple sobre unidades de adobe encuentran que la resistencia para el material de este caso de estudio son similares a los resultados compilados de autores referentes, particularmente son cercanos a los de los casos de estudio en Bogotá.
- En los ensayos de compresión sobre fragmentos de mortero de pega se obtienen valores por debajo de la resistencia de las probetas de adobe; estos datos no son comprobables por no encontrarse situaciones de este tipo caracterizadas. Además, se deben tomar con reserva en razón a que por la forma de extracción de las muestras no se lograron prismas de condiciones similares a las recomendadas en normas para morteros.
- A partir del ensayo de flexión con cargas perpendiculares al plano se determinó el módulo de rotura, el cual busca medir la capacidad de resistencia del mampuesto para cargas aplicadas que generan flexión en el sistema constructivo. Esta característica muestra nuevamente valores muy bajos.

**Tabla 3: Resultados de caracterización mecánica para adobe en la capilla doctrinera de Tausa Vieja.**

Capilla doctrinera de Tausa Vieja: Caracterización mecánica		
Característica mecánica	Resultados promedio obtenidos	
	Adobe (Unidades)	Mortero de pega (Fragmentos)
Resistencia a la compresión simple	3,04 MPa	2,08 MPa
Resistencia a la flexión - Modulo de rotura	0,41 MPa	

Pese a lo anterior, en buena parte las características mecánicas, son las que condicionan el desempeño del sistema estructural ante condiciones dinámicas, por lo cual también se advierte que el estudio en el mejoramiento de las características mecánicas es deseable. La Tabla 3 agrupa los resultados medios de la caracterización mecánica para el material estructural de la capilla doctrinera de Tausa Vieja.

**Resultados de la caracterización química:** En las fuentes de autores referentes que se consultaron no hay ninguna mención que tome en cuenta las propiedades o composición químicas de los sistemas constructivos en adobe. Entonces, surge la duda de la necesidad de caracterización de este tipo de propiedades.

En particular sobre las propiedades evaluadas para la caracterización química se destaca:

- Las distribuciones del contenido de humedad y de materia orgánica son muy homogéneas, lo que indica para el caso de la humedad que el conjunto de muestras y en general todas las áreas de estudio están al mismo régimen húmedo. Para el caso del contenido de materia orgánica, el resultado revela un valor moderado, es decir que existe poca agregación de materia orgánica ajena al suelo de origen del material con el que se fabricaron las unidades básicas y en últimas se construyó el sistema de mampuesto.
- De la etapa de obtención del contenido porcentual de elementos químicos, se destaca que siendo está la fracción de material predominante en la composición granulométrica de las muestras estudiadas, el contenido de sílice y aluminio son los de mayor presencia. Los demás elementos químicos analizados (hierro, calcio, sodio, potasio y magnesio) ocupan la fracción restante, además de otros elementos químicos que comúnmente no se analizan y que en general tienen menor presencia en la naturaleza.
- Como se indicó, la preexistencia de resultados sobre caracterización química para este material estructural no tiene referentes, por tanto los datos del contenido porcentual de cada elemento químico presentes en el lote de muestras de adobe asumen un patrón para siguientes trabajos en tal sentido. También son útiles como descriptores de composición para el estudio más profundo de la interacción de éstos con los componentes de materiales y nuevas tecnologías que se implementen para el reforzamiento de este sistema estructural.

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos de caracterización del adobe en la Capilla Doctrinera de Tausa Vieja.

**Tabla 4: Resultados de caracterización química para adobe en la Capilla Doctrinera de Tausa Vieja.**

Resultados consolidados para propiedades evaluadas			
Característica estudiada	Número de ensayos	Número de muestras	Contenido promedio
Contenido de humedad	28	28	11,62%
Contenido de materia orgánica	28	28	0,48%
Composición por elementos químicos	Silicio - Si	17	65,90%
	Aluminio - Al	17	15,88%
	Hierro - Fe	17	4,75%
	Calcio - Ca	17	2,55%
	Sodio - Na	17	0,57%
	Potasio - K	16	2,83%
	Magnesio - Mg	17	2,10%

## METODOLOGÍA GUÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE EDIFICACIONES EN TIERRA

En gran parte el modelo metodológico desarrollado en este trabajo queda agrupado mediante una guía metodológica diseñada para que muestre la caracterización de un Bien Inmueble de interés Cultural (BIC), cuyo sistema constructivo y estructural básico sea en tierra cruda y particularmente en adobe. Sin embargo deben poder incluirse, con algunas mínimas modificaciones, otros sistemas constructivos de bienes patrimoniales. La información recopilada, se debe agrupar en función de la etapa en la cual se obtiene, pues así se da claridad al proceso metodológico que se pretende plasmar en la guía. La guía debe mostrar un proceso lógico, secuencial y cronológico en la toma de información y obtención de los resultados. Asimismo, dejará ver e identificar las características tipológicas del sistema constructivo y estructural del edificio, las condiciones existentes de su funcionamiento estructural, los agentes externos que actúan como causas de posibles efectos sobre el sistema estructural; esto en la fase inicial de trabajo de campo. La Figura 9 muestra la Ficha Guía de Caracterización de sistemas constructivos en tierra, que define los aspectos que deben considerarse en el proceso de obtención de información para el conocimiento del sistema constructivo y estructural de un BIC. Cabe mencionar que al realizar consecutivamente la caracterización de inmuebles de carácter patrimonial, con tendencia hacia una tipología específica, se está consolidando el conocimiento que se puede obtener de cierto tipo de edificaciones. Con el uso de esta metodología propuesta no sólo se alcanza información relativa al material estructural que a lo largo de este trabajo se ha estudiado, sino que además se reconocen el sistema constructivo de la edificación, información relevante para el análisis del diagnóstico del comportamiento y de la situación estructural, así como otros valores de orden técnico que contribuyen en la toma de decisión para plantear medidas de rehabilitación efectivas, o acciones consistentes con la realidad y el estado estructural del edificio.

## CONCLUSIONES

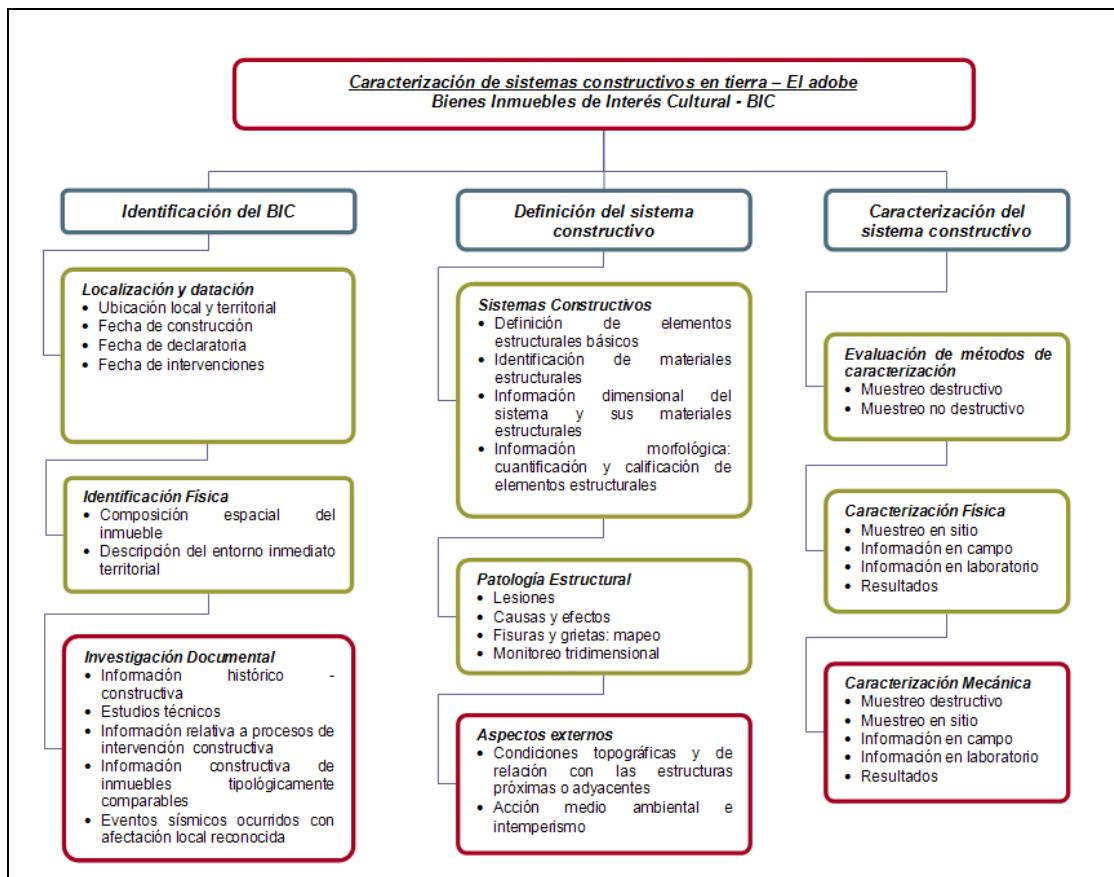
El uso del modelo metodológico aquí propuesto contribuye a conformar una base de datos de caracterización que amplíen el conocimiento de sistemas estructurales que utilicen la tierra como material estructural

- De la observación de los resultados en las diferentes áreas de caracterización estudiadas, principalmente en la física y mecánica, es recurrente la alta fragilidad y consecuentemente la vulnerabilidad que presenta el sistema.
- Para los sistemas constructivos en tierra cruda, adobe y otras modalidades de éstos presentes en un BIC, particularmente en arquitectura religiosa (capillas doctrineras) es muy importante el estudio de procedimientos de rehabilitación que involucren técnicas y materiales que mejoren las condiciones de su comportamiento estructural ante los efectos de deterioro que generalmente los acompañan.
- El estudio de normas para el ensayo de este tipo de materiales revela que el avance tecnológico en tal sentido está orientado a la investigación de materiales de utilización masiva como el caso de unidades de arcilla cocida o bloques de concreto. Entre tanto, la normalización de los materiales básicos de este sistema constructivo no se ha realizado profundamente. Se entiende esta situación es debida a la poca utilización que como material estructural se le da al adobe actualmente, así como a las demás variables del sistema constructivo en tierra cruda.
- La comparación de los resultados entre los análisis de caracterización y los de estudios de geotecnia dan luces de nuevas investigaciones para normalizar el estudio de sistemas constructivos en tierra, por lo menos en su

caracterización física y conservadoramente en algunas de sus propiedades mecánicas. No obstante, se deberá tener presente en cada caso caracterizado, las condiciones del posible suelo de origen, en cuanto a las modificaciones en el entorno, situación ésta que no es fácil de obtener.

Según los aspectos que se han tratado en este estudio, se puede presentar los siguientes conceptos sobre el comportamiento estructural de los sistemas constructivos en tierra:

- Los materiales y elementos constitutivos del sistema participan tan activamente como lo hacen los procesos para llevar a cabo el sistema en sí, es decir las fases de fabricación y construcción del mampuesto.
- Los factores externos o del entorno donde se encuentre el BIC construido en adobe y que lo afectan son función de la calidad de la manufactura del sistema, es decir que un adobe fabricado con proporciones adecuadas de sus componentes granulométricos y construido con buena calidad en la mano de obra, donde se hayan cuidado las trabas, los aparejados, espesores de pega y un calafateo homogéneo. En general se puede deducir que son medibles las mismas condiciones que optimizan a un sistema de mampostería, pero guardando las proporciones de resistencia que posee el adobe y su mortero de pega.
- La composición física del adobe está regulada por la presencia de los componentes granulométricos básicos, cuyas cuantías varían aún entre los mismos elementos del sistema constructivo de un mismo inmueble.
- Siempre están asociados al sistema de mampostería en adobe una serie de agentes de deterioro que indican una tendencia de la debilidad y fragilidad de este mampuesto; razón por la cual en su estudio se debe considerar, además de los aspectos físicos y mecánicos mostrados, el referente a la patología estructural que se presenten en el sistema.
- El estudio de estructuras de este tipo se debe realizar mediante el análisis de la evolución del daño; es decir que a partir del momento de aparición del deterioro estructural se pueden comparar las propiedades mecánicas de los materiales estructurales para verificar cuál es el nivel de degrado de la estructura y con ello deducir la condición de seguridad que continúa presente, o en el caso más desfavorable, la pérdida de ésta.



**Figura 9: Ficha guía de caracterización para sistemas constructivos en tierra cruda.**



Estudio de Bienes Inmuebles de Interés Cultural - BIC  
Sistemas Constructivos en Tierra - El Adobe  
FICHA DE CARACTERIZACIÓN - FIC, BIC

**1. Identificación del BIC**

**1.1 Localización - Datación**

Nombre CAPILLA DOCTRINERA DE TAUSA VIEJA

Ubicación Municipio de Tausa, Cundinamarca

Fecha de construcción 1,746

Fecha Declaratoria No registra

Fechas de intervención 1,985, sector frontal

**1.2 Identificación Física**

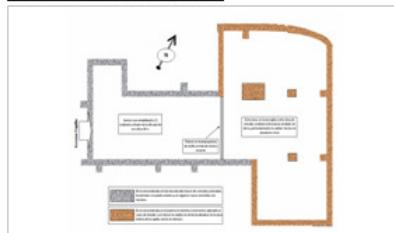
La capilla doctrinera del antiguo asentamiento del municipio de Tausa, ahora llamada de Tausa Vieja, está compuesta espacialmente por una sola nave longitudinal y cubierta a dos aguas. El inmueble está dividido claramente en dos sectores, el 1er. sector hoy en uso y único con cubierta corresponde aproximadamente a ½ nave en el sentido longitudinal. El otro sector corresponde a las ruinas de la capilla en lo que era el presbiterio, arco toral, parte de la nave y sacristía.

La localización de la capilla, sobre una baja colina permite la exposición de sus estructuras al intemperismo.

**1.3 Investigación Documental**

\* Estudio de suelos restauración ermita municipio de Tausa, Octubre de 2002.

**1.3 Esquemas del inmueble**



**2. Sistema Constructivo del BIC**

**2.1 Elementos estructurales**

Los elementos estructurales predominantes en el sistema constructivo permanente de la capilla son: cimientos en ciclópeo de piedra y argamasa, sobreimientos en tablón de arcilla cocida y muros en mampuesto de adobe con espesor variable entre 0,65 y 0,95 m, con altura hasta 4,75

**2.2 Materiales Estructurales**

Unidad de mampostería	Adobe, de color amarillo claro
Dimensiones promedio del adobe	Altura: 8.5 a 10 cms Largo: 33 cms Ancho: 15 cms
Mortero de pega	Tierra oscura de apariencia fina
Espesor de la pega	Variable entre 17 y 25 mmms
Aparejado	Tizón - Soga

**2.3 Patología Estructural**

Tipo	Lesión	Causa
FÍSICAS	HUMEDADES	<ul style="list-style-type: none"> <li>de obra</li> <li>de agua</li> <li>de filtración</li> <li>de condensación</li> <li>accidental</li> <li>por desplazamiento</li> <li>por levado diferencial</li> <li>extensión</li> <li>por carga</li> <li>por distorsión-contracción</li> <li>por soporte</li> <li>por estrés</li> </ul>
	SUCIEDAD	
	EROSIÓN	
	GRIETAS	
MECÁNICAS	FISURAS	
	DESPRENDIMIENTOS	
	EROSIÓN	
QUÍMICAS	EFLORESCENCIAS	
	OXIDACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> <li>Oxidación</li> <li>por oxidación previa</li> <li>por inmersión</li> <li>por aireación diferencial</li> <li>por galvánico</li> <li>por gravitar</li> </ul>
	CORROSIÓN	
	ORGANISMOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>animales</li> <li>vegetales</li> <li>química</li> </ul>
	EROSIÓN	

**2.4 Registro Fotográfico**



**3. Caracterización estructural del BIC**

**3.1 Caracterización Física**

Característica Física	Resultados promedio obtenidos	
	Adobe (Unidades)	Mortero de pega (Fragmentos)
Contenido de humedad	3.3%	3.22%
Contenido de materia orgánica	4.8%	5.49%
Peso específico	1.77 t/m <sup>3</sup>	1.83 t/m <sup>3</sup>
pH	6	6.6
Límites de consistencia	44.0%	32.0%
Límite Plástico (LP)	25.0%	14.0%
Índice Plástico (IP)	20.0%	17.0%
Composición granulométrica	Gravas 10.0% Arenas 18.0% Finos 72.0%	50.0%
Clasificación del suelo	USC CL - Arcillas inorgánicas de baja plasticidad AASHTO Suelo Lodo Arcilloso - Grupo A-7	

**3.1 Caracterización Mecánica**

Característica mecánica	Resultados promedio obtenidos	
	Adobe (Unidades)	Mortero de pega (Fragmentos)
Resistencia a la compresión simple	3.04 MPa	2.08 MPa
Resistencia a la flexión - Módulo de rotura	0.41 MPa	

**3.1 Caracterización Química**

Característica estudiada	Número de ensayos	Número de muestras	Contenido promedio
Contenido de humedad	28	28	11.62%
Contenido de materia orgánica	28	28	0.48%
Composición por elementos químicos			
Silicio - Si	17		65.90%
Aluminio - Al	17		15.88%
Hierro - Fe	17		4.75%
Calcio - Ca	17		2.55%
Sodio - Na	17		0.57%
Potasio - K	16		2.83%
Magnesio - Mg	17		2.10%

**Observaciones**

Este documento es la consolidación del estudio que caracteriza al sistema constructivo - estructural de la capilla y forma parte del mismo, la información de campo e informes de laboratorio de ensayos realizados.

**Información de la Caracterización**

Realizado por Juan Carlos Rivera T., Ing. Civil

Fecha: Mayo de 2004

**Figura 10: Ficha de caracterización para la Capilla doctrinera de Tausa Vieja, Cundinamarca.**

Se pudo concluir que de los ensayos a compresión sobre muretes para la obtención de módulos de elasticidad en el adobe, los resultados son bajos comparados con el rango inferior de los datos consolidados para estudios agrupados en esta investigación. Lo anterior posiblemente está ocasionado por tratarse de ensayos sobre probetas construidas con adobes jóvenes o de fabricación muy reciente, los cuales fueron cotejados con los resultados encontrados en los artículos compilados de diferentes autores. Estos resultados, permiten inferir que el periodo de exposición y de consolidación luego de la construcción del mampuesto en adobe es importante para la ganancia de resistencia a la compresión, dado que por tratarse de una gran masa en estado seudo húmedo se continúa de alguna manera un proceso de compactación del material que compone al adobe, así como al mortero de pega que une las unidades básicas de esta mampostería

**IMPLICACIONES DEL ESTUDIO**

A partir de este trabajo surgen inquietudes tales como cuál es el tratamiento de intervención permisible y exigible para los BIC presentes en territorio de Colombia. No se puede olvidar que poco más del 80% del territorio colombiano se encuentra en zonas de amenaza sísmica alta e intermedia (ahí se encuentran nuestros monumentos), donde aseguran la seguridad estructural de las edificaciones construidas en tierra es inaplicable y más aún la del tipo de edificaciones que nos ocupa, toda vez que en ellos se convoca a los grupos sociales de sus municipios y localidades. Existe entonces una doble responsabilidad frente a la salvaguarda de los monumentos, ambas de primer orden: una la de preservar la materialidad de la estructura edilicia por contener los valores arquitectónicos e históricos que estas conllevan, y otra igualmente importante la de salvaguardar la vida de los ciudadanos que las utilizan. Frente a esta doble responsabilidad se cuestiona: La metodología actual que se sigue en el estudio y análisis estructural para edificaciones patrimoniales, ¿es la acertada? Las técnicas y procedimientos de rehabilitación que se realizan, ¿son compatibles con este tipo de sistema constructivo? ¿Se les hace un seguimiento a las intervenciones que se les realizan a las edificaciones patrimoniales? Y en particular, ¿se verifica el nivel de acierto que una u otra técnica de intervención tiene con el sistema constructivo y

estructural del bien inmueble en cuestión? Una sencilla reflexión sobre estos cuestionamientos deja ver, optimistamente, cuánto hay por estudiar y profundizar en esta materia para que la actuación respetuosa y acertada sobre bienes patrimoniales sea la que deba ser, con la seguridad de que no se están alterando sus valores estéticos y funcionales y que se le están agregando en el ámbito de su comportamiento estructural condiciones que mejoran el desempeño integral del conjunto y cumplen con los preceptos mencionados

## Agradecimientos

Los autores agradecen a los funcionarios directivos y operativos de los Laboratorios de Suelos y Materiales del Departamento de Ingeniería Civil y del Laboratorio de Química de la Pontificia Universidad Javeriana en Bogotá, así como a los mismos del Departamento de Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

## REFERENCIAS

- Bermejo Martínez, F. (1991). *Química analítica general, cuantitativa e instrumental*. Paraninfo, Madrid.
- Bardou, P. (1979). *Arquitecturas de tierra*. Editorial Gustavo Gili. Barcelona, España.
- Bowles, J. (1981). *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil*. McGraw – Hill. México.
- Buol, S. W. (1991). *Génesis y clasificación de suelos*. Editorial Trillas. México.
- Burriel, F. (1978). *Química analítica cualitativa*. Paraninfo, Madrid.
- Buscaron, F. (1971). *Análisis inorgánico cualitativo sistemático*. Ediciones Martínez Roca, Barcelona, España.
- Cely, R. (2001). *Aportes al estudio estructural de las edificaciones patrimoniales en tierra*. PUJ. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Cepeda, J. M. (1991). *Química de Suelos*. Editorial Trillas, México.
- CIMOC (2002). *Centro de investigaciones en materiales y obras civiles – Corporación La Candelaria*. Santafé de Bogotá, Colombia.
- CORPORACIÓN LA CANDELARIA (2003). *Cartilla para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada*. Bogotá, Colombia.
- CYTED (1995). *Programa iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo*. Habiterra, Santafé de Bogotá, Colombia.
- Eyheralde, R. (1995). *La tierra estabilizada como material de construcción*. Centro interamericano de la vivienda – CINVA. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Garavito, F. (1979). *Propiedades químicas de los suelos*. República de Colombia. Ministerio de Hacienda y Crédito Público. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección Agrológica. Santafé de Bogotá, Colombia.
- González L., M. A. y Tapiales (1996). *Degradación y conservación del patrimonio arquitectónico*. Cursos de verano de El Escorial. Madrid, España.
- Harmer, D. (1976). *Ensayo e inspección de los materiales de ingeniería*. Compañía Editorial Continental, México.
- Hernández, O. (1983). *Evaluación de procedimientos para reforzar vivienda de adobe y hacerla resistente ante la acción sísmica*. Anales del Seminario Latinoamericano de Construcciones Sismo-Resistentes de Tierra. Lima, Perú.
- Heyman, J. (1999). *Estructuras de fábrica: Teoría, historia y restauración*. Escuela Técnica Superior de Arquitectura – Instituto Juan de Herrera. Madrid, España.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE CULTURA (1987). *Normas mínimas para la conservación de los bienes culturales*. Santafé de Bogotá, Colombia.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE CULTURA (1995). *Bienes inmuebles: Cartilla de Mantenimiento*. Casa Gráfica. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Kolthoff, I. M (1972). *Análisis químico cuantitativo*. Editorial Nigar, Buenos Aires, Argentina.
- López, C (2003). *Recopilación Iglesias – Monumentos Nacionales*. Foro realizado por la UNESCO. Universidad de Laguna, Tenerife, España.
- Mas-Guindal, A. (1996). *La reparación de la estructura*. Fundación Cultural COAM. Madrid, España.
- Melli, R. (1998). *Ingeniería estructural de los edificios históricos*, Fundación ICA. Ciudad de México, México.
- NSR-98 (1997). *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente*, Ley 400 de 1997, AIS – Asociación Colombiana de Reingeniería Sísmica, Santafé de Bogotá, Colombia.
- Ojeda, G. M. (2002). *Comportamiento estructural de construcciones en tierra*. Pontificia Universidad Javeriana, Santafé de Bogotá, Colombia.
- Otazzi P., G. (1998). *Ensayos de simulación sísmica de viviendas de adobe*. Pontificia Universidad Católica del Perú – Departamento de Ingeniería. Lima, Perú.
- Vargas N., J. (1984). *Resistencia sísmica de la mampostería de adobe*. Pontificia Universidad Católica del Perú – Departamento de Ingeniería. Lima, Perú.