

# Evaluación de los daños ocasionados por sismos en el Patrimonio Cultural del Estado de Puebla, México♦

**Cómo citar este artículo / To reference this article / Para citar este artículo:** Máximo, P., Ramos, R., Soto, R., Sámano, B. I. y Tetlatmalzín, D.L., Galindo, V., Ávila, M. y Yáñez, G. (2019). Evaluación de los daños ocasionados por sismos en el Patrimonio Cultural del Estado de Puebla, México. *Revista Criterios*, 26(2), 191-218.

**Fecha de recepción:** 28/05/2019  
**Fecha de revisión:** 30/05/2019  
**Fecha de aprobación:** 08/10/2019



**DOI:** <https://doi.org/10.31948/rev.criterios/26.2-art9>

♦ Artículo resultado de Investigación. Los sismos del 15 de junio de 1999 y del 19 de septiembre de 2017 dejaron daños y colapsos en el Patrimonio Cultural del Estado de Puebla, México. Este tipo de estructuras posee características particulares que las hace únicas e irremplazables, surgiendo la necesidad de aplicar técnicas y materiales adecuados para su restauración y rehabilitación estructural, sin alterar su valor intrínseco. En este trabajo se da a conocer parte de este Patrimonio Cultural dañado por el último sismo, una aplicación en Google Earth para visualizar los templos y los daños que tuvieron. Además, se presenta los daños en macroelementos producidos por los dos sismos y las técnicas de reparación (sismo de 1999).

\* ✉ Maestra en Ingeniería; Ingeniera Civil. Profesora Investigadora, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Correo electrónico: [ing\\_patricia@yahoo.com](mailto:ing_patricia@yahoo.com). [mx/patricia.maximo@correo.buap.mx](mailto:mx/patricia.maximo@correo.buap.mx)

\*\* Doctor en Ciencias; Ingeniero Topógrafo. Profesor Investigador, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Correo electrónico: [rogelio\\_ramosa@yahoo.com](mailto:rogelio_ramosa@yahoo.com) / [rogelio.ramos@correo.buap.mx](mailto:rogelio.ramos@correo.buap.mx)

\*\*\* Estudiante de la Licenciatura en Ingeniería Civil, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Correo electrónico: [shzricardo@gmail.com](mailto:shzricardo@gmail.com) / [ricardo.soto@alumno.buap.mx](mailto:ricardo.soto@alumno.buap.mx)

\*\*\*\* Estudiante de la Licenciatura en Ingeniería Civil, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Correo electrónico: [samano.icv@gmail.com](mailto:samano.icv@gmail.com) / [brayan.samano@alumno.buap.mx](mailto:brayan.samano@alumno.buap.mx)

\*\*\*\*\* Estudiante de la Licenciatura en Ingeniería Civil, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Correo electrónico: [dian\\_38@hotmail.com](mailto:dian_38@hotmail.com) / [diana.vazquez@alumno.buap.mx](mailto:diana.vazquez@alumno.buap.mx)

\*\*\*\*\* Maestro en Ingeniería; Ingeniero Mecánico y eléctrico. Profesor Investigador, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Correo electrónico: [vgalop@hotmail.com](mailto:vgalop@hotmail.com) / [victor.galindo@correo.buap.mx](mailto:victor.galindo@correo.buap.mx)

\*\*\*\*\* Maestro en Ingeniería; Ingeniero Topógrafo y Geodesta. Profesor Investigador, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Correo electrónico: [maxsurveyor@gmail.com](mailto:maxsurveyor@gmail.com) / [maximo.avila@correo.buap.mx](mailto:maximo.avila@correo.buap.mx)

\*\*\*\*\* Maestra en Educación Superior; Licenciada en Informática. Profesora Investigadora, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Correo electrónico: [gabryp\\_3@hotmail.com](mailto:gabryp_3@hotmail.com) / [gabriela.yanez@correo.buap.mx](mailto:gabriela.yanez@correo.buap.mx)

**Patricia Máximo Romero\*✉**  
**Rogelio Ramos Aguilar\*\***  
**Ricardo Soto Hernández\*\*\***  
**Brayan Ibrahim Sámano Rojas\*\*\*\***  
**Diana Laura Tetlatmalzín Vázquez\*\*\*\*\***  
**Víctor Galindo López\*\*\*\*\***  
**Máximo Ávila Cruz\*\*\*\*\***  
**Gabriela Yáñez Pérez\*\*\*\*\***

## Resumen

La República Mexicana es una región altamente sísmica debido a la interacción de las placas del Pacífico, Norteamericana, de Cocos, Rivera y del Caribe. La sismicidad histórica reporta daños importantes en el Patrimonio Cultural del Estado de Puebla, México, declarado en 1987 por la UNESCO como Patrimonio Cultural de la Humanidad. Este patrimonio fue dañado por los sismos del 15 de junio de 1999 y del 19 de septiembre de 2017. El último sismo dañó templos de municipios del Estado de Puebla, donde los daños en macroelementos fueron similares a los observados por el sismo de 1999. En este trabajo se hace referencia a diecisiete templos dañados por el sismo de 2017 y su localización en Google Earth, los principios de conservación y las técnicas de rehabilitación estructural. La rehabilitación del Templo de San Agustín permitió concluir que las técnicas aplicadas serán únicas, dependiendo del daño en el macroelemento.

**Palabras clave:** Sismo, Patrimonio Cultural, templo, evaluación, restauración, daño.

# Evaluation of damages caused by earthquakes in the Cultural Heritage of the State of Puebla, Mexico

## Abstract

Mexican Republic is a seismic region due to the interaction of the Pacific, North American, Cocos, Rivera and Caribbean plates. The historic seismicity reports important damage over Cultural Heritage of Puebla, State, Mexico, declared in 1987 by the UNESCO, Cultural Heritage of Humanity. The earthquakes of 15 June 1999 and 19 September 2017 damaged this Heritage. The last earthquake damaged temples of municipalities of the State of Puebla, where damages to macro elements were similar that those observed on 1999 earthquake. In this work, we refer to seventeen temples damaged on 2017 earthquake and their location in Google Earth, conservation principles and structural rehabilitation techniques. The rehabilitation of Temple of San Agustín allowed concluding that the applied techniques will be unique, depending on the damage in the macro element.

**Key words:** Earthquake, Cultural Heritage, temple, evaluation, restoration, damage.

# Avaliação dos danos causados por terremotos no Patrimônio Cultural do Estado de Puebla, México

## Resumo

A República Mexicana é uma região altamente sísmica devido à interação das placas do Pacífico, América do Norte, Cocos, Rivera e do Caribe. A sismicidade histórica reporta danos importantes ao Patrimônio Cultural do Estado de Puebla, México, declarado em 1987 pela UNESCO, Patrimônio Cultural da Humanidade. Este patrimônio foi danificado pelos terremotos acontecidos em 15 de junho de 1999 e em 19 de setembro de 2017. O último terremoto danificou os templos de alguns municípios do Estado de Puebla, onde os danos aos macroelementos foram semelhantes aos observados no terremoto de 1999. Neste trabalho são referenciados dezessete templos danificados no terremoto de 2017 e sua localização em Google Earth, princípios de conservação e técnicas de reabilitação estrutural. A reabilitação do Templo de San Agustín permitiu concluir que as técnicas aplicadas serão únicas dependendo dos danos no macroelemento.

**Palavras-chave:** Sismos, Patrimônio Cultural, templo, avaliação, restauração, dano.

## 1. Introducción

El centro de la ciudad de Puebla, México, fue declarado el 18 de noviembre de 1987 por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) como “Zona de Monumentos Históricos de la Ciudad de Puebla de Zaragoza” (UNESCO, Ref. 416) e incluida en la lista de Patrimonio Mundial desde el 11 de diciembre del mismo año; tiene una extensión de 6.99 kilómetros cuadrados con edificios históricos y arquitectónicos (Decreto 11-18-77). Esta zona abarca una extensión de 391 manzanas y 2.619 edificios con valor histórico, construidos entre los siglos XVI y XIX.

Los templos forman parte del Patrimonio Cultural, material reconocido por esta organización dentro de la clasificación de monumentos, cuyo objetivo principal es promover la identificación, protección y preservación del Patrimonio Cultural Material e Inmaterial en todo el mundo.

En el Estado de Puebla, los templos y los edificios civiles que forman parte del Patrimonio Cultural están construidos con mamposterías no reforzadas, compuestas de rocas naturales (cantería), piezas de adobe y ladrillos unidos con morteros de cal y arena fina, decorados con tableros de azulejo y molduras de yeso, predominando el estilo barroco y los elementos ornamentales. La combinación de estos materiales dio como resultado, construcciones robustas y de gran tamaño, cuyo método constructivo no se sustentó en un diseño ingenieril, sino que se limitó a la práctica de prueba-error. El sistema estructural trabaja por cargas de gravedad que son transmitidas a los elementos verticales como esfuerzos de compresión, limitando su capacidad para soportar esfuerzos de tensión y de cortante inducidos por las fuerzas sísmicas. El tapiado de arcos, la apertura de puertas y ventanas, las deficientes reparaciones, la unión con elementos constructivos modernos, las sobrecargas al cambiar su uso original (edificios históricos que actualmente funcionan como oficinas de gobierno, escuelas, etc.), la configuración asimétrica en planta y en altura, y los daños acumulados por sismos anteriores, han contribuido a su deficiente comportamiento sísmico. Las patologías originadas por la falta de mantenimiento y agentes contaminantes suspendidos en el ambiente han degradado los materiales de construcción, los cuales a lo largo del tiempo han perdido su resistencia original, incrementando su vulnerabilidad ante la acción sísmica.

La conservación de los templos requiere de proyectos de intervención que deberán incluir la configuración estructural y el levantamiento de daños para implementar técnicas adecuadas de restauración, refuerzo y/o rehabilitación estructural, utilizando materiales que no alteren su originalidad, y sobre todo,

pensando en la seguridad e integridad de las personas. También se deberá aplicar pruebas no destructivas para identificar los daños, sin alterar el valor intrínseco de los templos.

En la Carta de Venecia de 1964 (International Council of Monuments and Sites, ICOMOS, 1965) y en los criterios del Comité Científico para el Análisis y la Restauración de Estructuras del Patrimonio Arquitectónico (ISCARSAH) de ICOMOS, se establece los principios de conservación y los criterios modernos de intervención de monumentos, mismos que permiten seleccionar la técnica adecuada de intervención (Peña, 2010). Por tanto, cualquier reparación que se realice estará sujeta a los lineamientos establecidos en los documentos mencionados.

Los sismos ocurridos el 15 de junio de 1999 y el 19 de septiembre de 2017 dañaron severamente gran parte del Patrimonio Cultural del Estado de Puebla, generando daños como fisuras y grietas en muros y bóvedas, colapsos parciales o totales en cúpulas y torres, principalmente. Como no existe un reglamento o norma para rehabilitar este patrimonio, solamente principios y criterios de conservación, entonces cada caso será particular y la solución deberá ajustarse al tipo de daño que tenga la estructura.

En el año de 1999, la información de los daños causados por el sismo no fluyó rápidamente. Pero los templos afectados fueron reconstruidos aplicando las técnicas que se conocía hasta el momento. Sin embargo, en 2017, el uso de las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC), a través de los medios digitales de comunicación, permitió conocer casi inmediatamente, los escenarios de desastre en forma visual y descriptiva.

En Italia, después del sismo de Friuli en 1976, los investigadores analizaron detalladamente la configuración estructural de los templos y su comportamiento sísmico, sentando las bases para su mejor comprensión.

La rehabilitación del Templo de San Agustín, localizado en el Centro Histórico de la ciudad de Puebla, el cual resultó dañado severamente por el sismo de Tehuacán, es un ejemplo que muestra cómo aplicar técnicas particulares de rehabilitación, según el tipo de daño en la estructura.

## 2. Metodología

Se seleccionó los sismos del 15 de junio de 1999 y del 19 de septiembre de 2017, porque fueron los dos eventos que causaron más daño al Patrimonio Cultural del Estado de Puebla.

Con respecto al primer sismo, se tomó como referencia el Informe Técnico del Sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999 (Alcocer et al., 1999) donde se describe las características del sismo y los daños que dejó en la infraestructura de los Estados afectados: Puebla, Morelos, México, Tlaxcala, Veracruz y Guerrero, así como los daños económicos y el costo de reposición. De igual manera, presenta el análisis de las fallas en los monumentos históricos, las frecuencias de los daños observados en sus macroelementos y las opciones de rehabilitación.

El sismo del 19 de septiembre de 2017 se documentó principalmente en periódicos digitales alojados en Internet, lo que facilitó el conocimiento, casi de forma inmediata, de los daños en la infraestructura. Este sismo dañó principalmente un número considerable de templos de los cuales se seleccionó 17, para crear una referencia en Google Earth que permitiera localizarlos fácilmente y relacionarlos con el tipo de daños reportados por los medios de comunicación digitales.

Se revisó documentos en la literatura especializada: artículos, memorias de congresos, etc., para conocer la configuración estructural de los templos y las recomendaciones de rehabilitación; inclusive, las pruebas no destructivas que se aplica a este tipo de estructuras.

La información de los macroelementos dañados en 1999 y 2017 sirvió para comparar y determinar los más vulnerables, de acuerdo con la configuración estructural de los templos, así como las propuestas de rehabilitación.

## 2.1 Sismicidad histórica del Estado de Puebla

El mapa de sismicidad de la República Mexicana ubica al Estado de Puebla en una zona de mediana intensidad. La frecuencia de sismos importantes varía en cuanto a su magnitud, pero resalta el ocurrido el 15 de junio de 1999 con magnitud de Mw 7.0 y epicentro a 20 km al suroeste de la ciudad de Tehuacán, Puebla (CENAPRED, 1999), y el ocurrido el 19 de septiembre de 2017 con magnitud de 7.1 y epicentro a 8 kilómetros al noroeste de Chiautla de Tapia, Puebla, datos reportados por el Servicio Sismológico Nacional (SSN, 2017).

Los sismos que afectan al Estado de Puebla tienen su origen en tres fuentes: la zona de subducción que corre a lo largo de la costa del Pacífico -sismos de subducción-; la zona donde la placa de Cocos subduce a la placa norteamericana a profundidades mayores a los 50 kilómetros -sismos de falla normal-; y los sismos generados por fallas locales.

La Tabla 1 muestra la sismicidad histórica de algunos eventos importantes que se ha sentido en el Estado de Puebla durante la segunda mitad del siglo XIX, el

siglo XX y lo que va del siglo XXI. Como puede observarse, los sismos pueden presentarse en cualquier momento y tienen características particulares en cuanto a magnitud, profundidad, epicentro, entre otras, que pueden hacerlos más o menos destructivos, dependiendo de la vulnerabilidad de su zona de influencia.

Tabla 1. Sismicidad histórica de la ciudad de Puebla

Fecha	Magnitud	Profundidad (Km)	Distancia epicentral
17/05/1879 <sup>(3), (4)</sup>	7.0	-	Entidad actual: Puebla Epicentro: Oaxaca
03/02/1911 <sup>(1)</sup>	6.5	80	19 km al este de Huajuapán de León, Oax
03/01/1920 <sup>(2), (4)</sup>	6.4	10	13 km al norte de Huatusco, Ver. Epicentro estimado: Puebla
19/04/1920 <sup>(1), (4)</sup>	6.7	110	9 km al sureste de Coscomatepec, Ver. Epicentro estimado: Veracruz
09/02/1928 <sup>(1), (4)</sup>	6.5	84	9 km al noreste de Acatlán de Osorio, Pue. Epicentro estimado: Puebla
14/01/1931 <sup>(3), (4)</sup>	7.8	40	30 km al oeste de Miahuatlán, Oax. Epicentro estimado: Oaxaca
25/07/1937 <sup>(3), (4)</sup>	7.3	85	24 km al norte de Tres Valles, Ver. Epicentro estimado: Veracruz
11/10/1945 <sup>(1), (4)</sup>	6.5	95	31 km al suroeste de Tehuacán, Pue. Epicentro estimado: Puebla
24/05/1959 <sup>(1), (4)</sup>	6.8	80	28 km al sureste de Tepelmeme, Oax. Epicentro estimado: Oaxaca
28/08/1973 <sup>(1), (4)</sup>	7.3	82	30 km al suroeste de Tierra Blanca, Ver. Epicentro estimado: Veracruz
24/10/1980 <sup>(1), (4)</sup>	7.1	65	19 km al oeste de Acatlán de Osorio, Puebla

15/06/1999 <sup>(2)</sup>	7	70	20 km al suroeste de Tehuacán. Puebla
19/09/2017 <sup>(1)</sup>	7.1	57	8 km al noroeste de Chiautla de Tapia, Puebla

(1) Servicio Sismológico Nacional, (2) Servicio Sismológico de Estados Unidos, (3) Centro Nacional de Prevención de Desastres, (4) Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros.

Elaboración: M. I. Patricia Máximo Romero.

El informe técnico publicado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2001) reporta 1.124 edificios históricos dañados, de los cuales un 10 % tiene daños severos; un 40 % tiene daños moderados y un 50 %, daños leves. El sismo del 19 de septiembre de 2017 dejó daños en 465 inmuebles catalogados como Patrimonio Monumental, entre los cuales había 241 templos.

## 2.2 Daños en el Patrimonio Cultural del Estado de Puebla

A las 13:14:39 horas del día 19 de septiembre de 2017 el SSN reportó un sismo con magnitud 7.1 localizado en el límite estatal entre Puebla y Morelos, a 12 km al sureste de Axochiapan, Morelos, a 120 km de la Ciudad de México y a ocho kilómetros al noroeste de Chiautla de Tapia, Puebla. Las coordenadas epicentrales fueron: 18.40 latitud N y -98.72 longitud W con profundidad de 57 kilómetros, lo cual permitió considerar el sismo, de profundidad intermedia muy cercana a la superficial. De acuerdo con los estudios del SSN y de la UNAM, el rango de aceleración máxima del suelo en el Valle de México estuvo entre los 20 y los 112  $\text{cm/s}^2$ . EL sismo dejó daños principalmente en ocho Estados, en la infraestructura de orden público, en la propiedad privada y en el Patrimonio Cultural. Los Estados más afectados fueron Puebla y Morelos, incluyendo Ciudad de México, donde se percibió las intensidades más fuertes. La Figura 1 muestra el mapa de intensidades de este sismo en unidades PGA ( $\text{cm/seg}^2$ ).

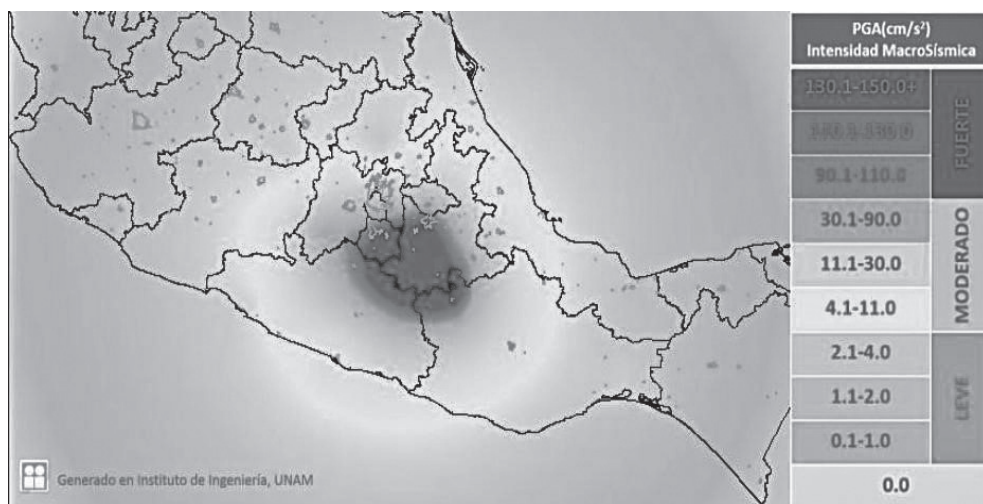


Figura 1. Mapa de intensidades del sismo del 19 de septiembre de 2017.

Servicio Sismológico Nacional. (2017). Recuperado de [http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX\\_rep\\_esp\\_20170919\\_Puebla-Morelos\\_M71.pdf](http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170919_Puebla-Morelos_M71.pdf).

En la capital del Estado de Puebla se contabilizó 97 edificaciones históricas afectadas, principalmente, construcciones ubicadas en esquinas y templos tales como: San Sebastián, La Compañía, El Carmen, La Ermita Ocotlán, Nuestra Señora de Ocotlán, Capilla de Corpus Christi, San Jerónimo, La Concordia, San Juan de Letrán, San Felipe Hueyotiplan, La Purísima Concepción, San Francisco de Asís, Casa de la Familia San Juan Pablo II, Parroquia de la Santa Cruz, San Juan del Río, Ecce Homo, El Cirineo, El Calvario y San Juan Bautista Rebozo.

Los municipios de San Pedro Cholula, Atlixco, Izúcar de Matamoros, Tochimilco y Huejotzingo son algunos de los que presentaron el mayor número de edificaciones dañadas. Capillas como la de San Francisco Huilango en el municipio de Tochimilco y la de Santa María Cohetzala, se desplomaron por completo; otras como la de Santiago Apóstol en el municipio de Atzala, colapsaron del techo y solo los muros de mampostería quedaron en pie; o la Iglesia de la Virgen de los Remedios en Cholula, que sufrió graves daños en sus torres (e-consulta, 2017).

La Figura 2 muestra los municipios localizados en la zona sísmica y parte de la zona penísísmica del Estado de Puebla, donde los templos fueron dañados:



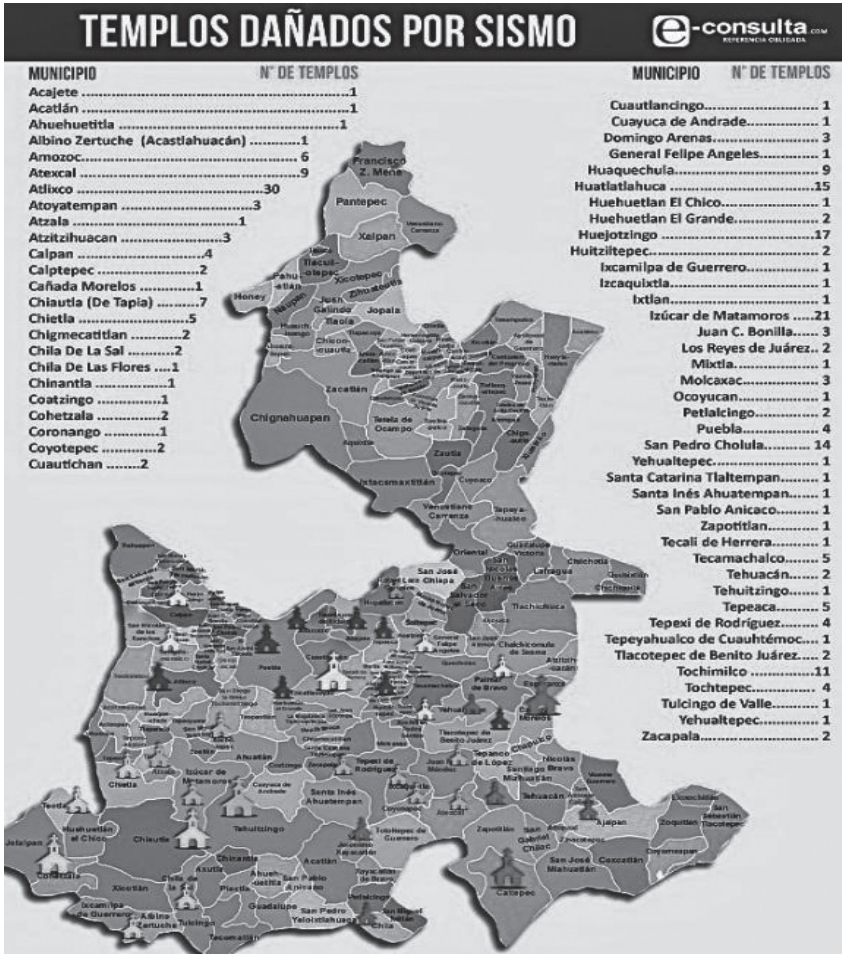


Figura 2. Mapa de los municipios del Estado de Puebla y el número de templos dañados por el sismo del 19 de septiembre de 2017.

Fuente: Núñez (2017).

Del total de los templos afectados se seleccionó una muestra representativa de aquellos que tuvieron más daños y que se encuentran ubicados dentro de la Ciudad de Puebla, Atlixco, Cholula, Amozóc y Tecamachalco. Dicha selección se encuentra alojada en la nube bajo el nombre de Patrimonio Dañado Sismo 19S 2017, donde el link de descarga es [https://docs.google.com/uc?export=download&id=1fvr1qkK2N\\_aES9prZkIFCiKcvqg1QO8](https://docs.google.com/uc?export=download&id=1fvr1qkK2N_aES9prZkIFCiKcvqg1QO8).

La Figura 3 muestra un ejemplo de las imágenes de los templos en Google Earth, así como su localización, la descripción de los daños y el enlace donde se encuentra esta información.



Figura 3. Templo de San Pedro Mexicaltzingo, localizado en el municipio de Cholula, Puebla.

Las Figuras 4 y 5 muestran las imágenes de dos templos sin daño y el daño que ocasionó el sismo del 19 de septiembre de 2017.



Figura 4. Templo de Nuestra Señora de los Remedios localizado en San Pedro, Cholula.

Fuente: Méndez (2017).



Figura 5. Templo de San Francisco, localizado en la ciudad de Puebla (Delso, 2013).

### 2.3 Configuración estructural

Los templos edificados en la época de la Nueva España son construcciones de mampostería unida con morteros de cal, agua y arena que trabajan por gravedad; es decir, utilizan la carga muerta -peso propio- para estabilizarse y, aunque el espesor de sus elementos les proporciona cierto grado de estabilidad, algunos de éstos tienden a quedar expuestos ante cargas laterales producidas por sismo. Dichas construcciones fueron edificadas por el método empírico, careciendo de un diseño estructural, rigiéndose más por el diseño arquitectónico, lo cual plantea un problema importante relacionado con el comportamiento sísmico del inmueble.

La mayoría de los templos seleccionados pertenecen a los comúnmente conocidos como ‘franciscanos’. Existen documentos históricos en los que se narra la llegada de los misioneros franciscanos al territorio mexicano, donde en el año de 1524 arribó la primera Orden conformada por el grupo conocido como ‘Los Primeros Doce’, quienes se extendieron por todo el territorio edificando templos y conventos para evangelizar a diversos grupos indígenas, guardando en su arquitectura rasgos característicos tales como atrios, capillas abiertas, capillas posas, puerta porciúncula, orientación tradicional, capilla del tercer orden, claustros y conventos. Los templos franciscanos son, en su mayoría, asimétricos por geometría -con una sola torre-, concentrándose mayor cantidad de masa en una zona, factor que desfavorece a la edificación en general, debido a la concentración de esfuerzos que se genera durante un sismo.

El tamaño de estos elementos arquitectónico-estructurales, su ubicación en la configuración estructural, el tipo de suelo y los materiales de construcción, dan como resultado un conjunto de partes que reciben fuerzas externas y que interactúan entre sí a través de sus uniones. Sin embargo, el movimiento telúrico

afecta de manera particular a cada elemento, esperando que su comportamiento estructural sea diferente, cuya divergencia puede ser originada por la diferencia de materiales y su degradación, la relación de esbeltez, los elementos añadidos o no unidos, cargas añadidas o incluso la asimetría de las construcciones que puede inducir a fenómenos de torsión debido a la excentricidad entre el centro de masa y el centro de rigidez, como fue el caso del Templo de la Compañía, dañado por el sismo de Tehuacán en 1999.

Cuando los templos presentan daño ocasionado por un comportamiento sísmico no lineal, la acción de cargas sobre la estructura tiende a degradar su rigidez al no regresar a su posición original. Por tanto, es difícil encontrar la relación daño-comportamiento debido a las grandes dimensiones de las estructuras, dificultando la evaluación global.

El análisis del comportamiento sísmico de los templos y su relación con los daños se puede hacer aplicando la teoría de los macroelementos, que se basa en las observaciones de los daños en templos causados por el sismo de 1976 en Friuli, Italia (Doglioni, Grimaz y Moretti, 2018). Los macroelementos son los elementos que resultan de discretizar la estructura; es decir, de dividirla en partes para analizar y relacionar el tipo de daño con el elemento dañado, lo cual permite interpretar cualitativamente el comportamiento de los templos a través del daño. Este enfoque permitió evaluar e investigar las partes más vulnerables de los templos en Italia. La variada configuración estructural de estas edificaciones hacía casi imposible establecer correlaciones entre elementos arquitectónicos-estructurales y el daño. Por tanto, Doglioni et al. (2018) asumieron el macroelemento como unidad de referencia. La discretización en macroelementos hizo posible identificar, desde el punto de vista arquitectónico-estructural, fachadas, naves, ábsides, capillas, etc., la correlación entre los daños y su comportamiento sísmico. En la modelación numérica, los macroelementos son definidos como “partes de una iglesia que tienen un comportamiento estructural autónomo y unitario ante fuerzas sísmicas” (Meza, 2013, p. 21), facilitando la investigación sobre el daño y su vulnerabilidad local y global.

Lagomarsino (1998, citado por Meza, 2013) desarrolló una metodología para evaluar el índice de daño de los templos a través de una interpretación subjetiva de 18 indicadores, los cuales incluyen los modos de falla más comunes.

A continuación se da una breve explicación del significado de macroelementos, con el objetivo de relacionar su configuración estructural y la discretización de los elementos arquitectónico-estructurales en la modelación numérica,

así como en el análisis de registros de vibración ambiental para determinar su comportamiento sísmico, tanto en forma independiente como global.

Los macroelementos son formados cuando hay presencia de mecanismos de daño por sismo, creando secciones con comportamiento similar al de los cuerpos rígidos. Así, el daño actúa en forma de articulación o desliga el elemento del resto de la estructura (Doglioni et al., 2018). La Figura 6 evidencia la discretización en macroelementos de un templo en forma de cruz latina.

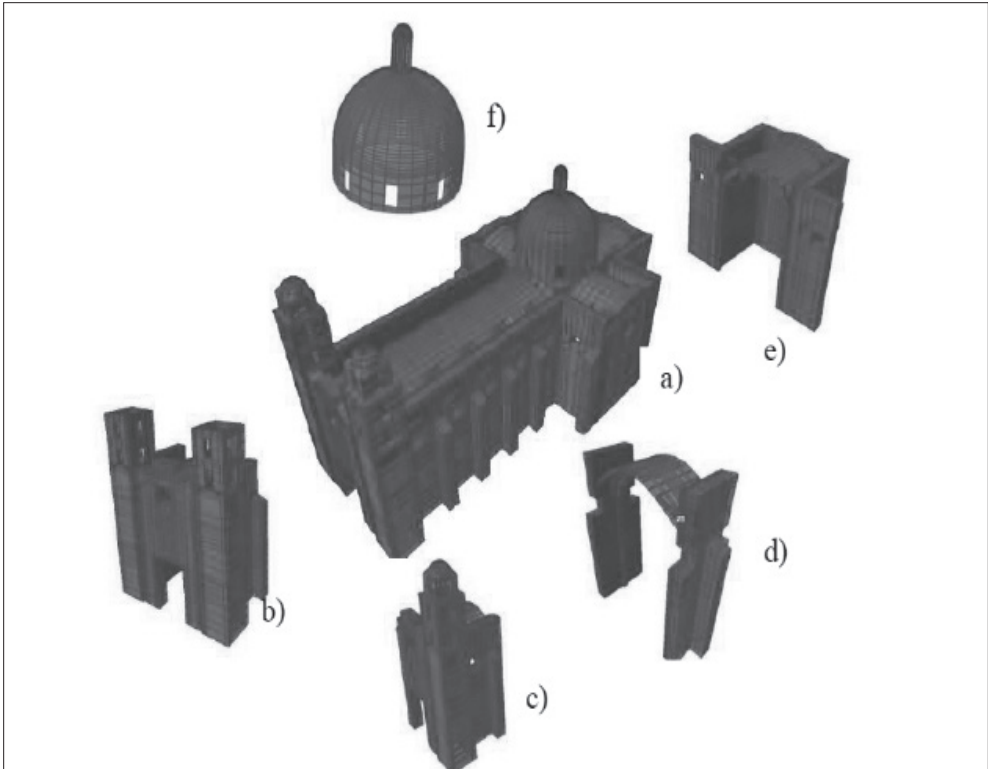


Figura 6. Macroelementos típicos de un templo en forma de cruz latina: a) modelo del templo completo; b) macroelemento fachada; c) macroelemento torre de campanario; d) macroelemento nave; e) macroelemento ábside; f) macroelemento cúpula.

Fuente: Peña (2010, p. 54).

## 2.4 Tipo de materiales

Los materiales utilizados en la construcción de los templos eran, en su mayoría, obtenidos de zonas cercanas a la ubicación del inmueble y con ellos no se construía en una sola etapa, pues en muchos casos se empleaba materiales diferentes y cuatrapeos de rocas con diversas formas geométricas que no tenían ningún orden. Este antecedente crea la necesidad de recabar información y documentar las etapas de construcción y de intervención para conocer los materiales y sistemas constructivos empleados.

Actualmente se tiene mayor conocimiento sobre las características de los materiales utilizados en la intervención, siendo los más comunes, la piedra, el mortero de cal-arena, la tierra y la madera.

Las rocas utilizadas fueron calizas, travertinos, tobas volcánicas, dolomitas, mármol, basalto, granito, sienita, diorita, entre otras, con resistencias mínimas a la compresión, que varían entre 200 y 1200 kg/cm<sup>2</sup>.

La cal contenida en los morteros era elaborada con roca caliza (carbonato de calcio), sometida a calcinación, para obtener la cal viva; al hidratarse con agua o humedad, la transforma en cal apagada -hidróxido de calcio-. Una de las características más importantes de la cal apagada es que le proporciona al mortero mayor adherencia y plasticidad al lograr la compatibilidad a través de la homogeneización de los materiales originales con los materiales nuevos.

La tierra utilizada es altamente degradable por intemperismo y humedad, presentando baja resistencia ante la acción sísmica con un rango de variación de resistencia a la compresión de 2 a 3 kg/cm<sup>2</sup>. La resistencia a la tensión es menor a 0.5 kg/cm<sup>2</sup>. (Martínez, 2018).

## 2.5 Principios de conservación

En la Carta de Venecia de 1964 (ICOMOS, 1965) se estipula que la restauración deberá ser una operación con carácter excepcional, cuyo objetivo es conservar y revelar los valores estéticos e históricos del monumento, fundamentados en el respeto a la esencia antigua y a los documentos auténticos.

En México, el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) es el organismo federal encargado de proteger su Patrimonio Cultural, regulando las acciones para mantenerlo, conservarlo, restaurarlo y rehabilitarlo, según los criterios establecidos en los Lineamientos Institucionales Generales en Materia de Conservación del Patrimonio Cultural (INAH, 2014), en los cuales se define los conceptos que sustentan la conservación de los valores intrínsecos de este patrimonio, fundamentados en la Carta de Venecia y en los criterios ISCARSAH de ICOMOS:

**Conservación:** Acciones realizadas para salvaguardar el patrimonio cultural, respetando sus valores y significados, y garantizando su acceso y disfrute para generaciones presentes y futuras. El término “conservación” es genérico e incluye la conservación preventiva, las acciones de conservación directa y la restauración.

**Conservación preventiva:** Todas las acciones y medidas que controlan o retardan el deterioro sin que se requiera necesariamente de una intervención

directa. Se entiende que conservación preventiva es sinónimo de preservación y de mantenimiento.

**Conservación directa:** Acciones aplicadas de manera directa sobre un monumento, que tengan como objetivo, estabilizarlo o detener o limitar el deterioro que sufre.

**Restauración:** Acciones aplicadas de manera directa a un monumento estable, que tengan como objetivo, facilitar su apreciación, comprensión y uso. (pp. 1-2).

Considerando estos criterios, se sobreentiende que las técnicas aplicadas a la conservación del patrimonio no deberán alterar la historicidad de la obra; por el contrario, deberán contribuir a la continuidad natural de su historia y conservar sus características morfológicas, espaciales, tipológicas y tecnológicas.

En la República Mexicana, la intervención de los inmuebles catalogados 'Patrimonio Histórico', deberá ser autorizada previamente por el INAH, organismo que cuenta con un área de especialistas que laboran en las Coordinaciones Nacionales de Monumentos Históricos, quienes dan consulta para la correcta conservación del patrimonio. Además, es necesario contar con la autorización por medio del trámite INAH 00-008 que deberá ser presentado por un arquitecto con cédula profesional.

En los proyectos de conservación es importante poseer toda la información histórica del estado físico y estructural del inmueble, así como la documentación de todas las intervenciones realizadas, a través de todos los medios posibles: documentación escrita, fotográfica, filmación, fichas informativas, entre otras.

## 2.6 Rehabilitación estructural

En el proyecto de intervención se deberá incluir datos históricos del templo: etapas de construcción, tipo de materiales, restauraciones, rehabilitaciones estructurales, etc. Se hará mediciones de la respuesta *in situ*; se identificará patologías y tipos de fallas; se evaluará el nivel de seguridad estructural: crítico, moderado, leve. Por último, se determinará las medidas de intervención y se seleccionará las técnicas de rehabilitación.

Actualmente, para tener mayor conocimiento del estado físico y estructural de los inmuebles, se realiza pruebas experimentales que pueden ser destructivas y/o no destructivas. Las pruebas no destructivas en materiales son aquellas que permiten conocer el daño en los mismos:

1. Pruebas acústicas (velocidad de pulso de sonido, impacto-eco, tomografía sónica, georadar). Sirven para localizar oquedades, grietas, tipo de material, heterogeneidad, vacíos, espesor de elementos, etc.

2. Pruebas de resistencia a compresión. Se obtiene la resistencia a compresión en zonas de elementos estructurales potencialmente dañados, aplicando golpes con un esclerómetro.
3. Pruebas tensionales (gatos planos). Se obtiene la estimación del estado tensional de compresión en una zona localizada de la estructura, el módulo de deformación y el coeficiente de Poisson (Lombillo, Villegas, Silió y Hoppe, 2008).

Las pruebas no destructivas en estructuras son aquellas que permiten conocer el comportamiento dinámico de las mismas:

1. Pruebas con registros de vibración ambiental (periodos fundamentales de vibrar, formas modales, porcentaje crítico de amortiguamiento).
2. Pruebas con registro de sismos fuertes (periodos fundamentales de vibrar, formas modales, porcentaje crítico de amortiguamiento). Se obtiene resultados a largo plazo.

Los registros de vibración ambiental o de sismos fuertes son sometidos a un tratamiento que incluye la corrección de línea base, el filtrado de la señal, el cálculo de los espectros de Fourier y la Función de Transferencia aplicando alguna técnica específica.

Las pruebas destructivas son aplicadas para llevar a la falla un espécimen y determinar su resistencia máxima bajo la acción de una carga conocida:

1. Pruebas para obtener las propiedades mecánicas de los materiales.
2. Pruebas para determinar la respuesta de un elemento o sistema estructural.

También se puede realizar pruebas en modelos a escala e instrumentados con acelerómetros y potenciómetros, apoyados en mesas vibratorias para medir su respuesta ante un sismo dado, obteniendo desplazamientos máximos, periodos y porcentaje crítico de amortiguamiento (Peña y Lourenço, 2012).

El reforzamiento estructural promoverá el uso de materiales idénticos a los originales y técnicas modernas que mejoren la resistencia del inmueble.

Los materiales utilizados en la intervención deberán tener las siguientes características:

- Compatibilidad entre los materiales originales y los nuevos.
- Mayor tiempo de durabilidad de los elementos para mantener las propiedades mecánicas de la estructura.



- Reversibilidad que permita remover nuevos elementos para adaptarlos con soluciones futuras más eficientes.

A continuación se menciona brevemente algunas técnicas tradicionales de refuerzo:

- Conexiones locales (grapas).
- Confinamiento de columnas con placas de acero y confinamiento de muros con barras de acero inoxidable colocadas transversalmente.
- Contrafuertes.
- Reconstrucción local, reemplazando la mampostería dañada por mampostería nueva con propiedades similares a la original.
- Rejunteo, reemplazando el mortero dañado en las juntas por mortero nuevo compatible y durable que mejore las propiedades mecánicas.
- Substitución completa de elementos estructurales, preferentemente con materiales y tecnologías similares a las originales para recuperar la función original del elemento o la corrección de defectos.
- Tensores (cables o barras de acero) para anclar un elemento con el objetivo de mejorar la estabilidad de la estructura y evitar grandes deformaciones.
- Costuras armadas hechas con barras de metal en perforaciones que después sean inyectadas, generalmente, con mortero.
- Encamisados de concreto armado que cubran elementos originales sometidos a grandes niveles esfuerzos de compresión y deformación lateral excesiva, principalmente. También son utilizados para reforzar cimentaciones.
- Inyección con mortero o resinas epóxicas de cavidades, vacíos o grietas de elementos previamente tratados, para mejorar las características del material.
- Refuerzo en las caras externas de los elementos utilizando material de alto rendimiento (FRP, mallas de acero, polímeros, etc.) para incrementar su capacidad. (Peña y Lourenço, 2012).

## 2.6 Caso de aplicación. Templo de San Agustín

La figura 7 muestra la torre del Templo de San Agustín. Los autores de este artículo realizaron un estudio patológico en algunas zonas del templo. Se

elaboró un reporte fotográfico de las zonas afectadas, se tomó muestras físicas de elementos con patologías en zonas húmedas para conocer su composición química y determinar si existían contaminantes atmosféricos depositados que contribuyeran a la degradación de los materiales. También, se registró variables ambientales en el interior del templo y en su patio trasero para correlacionarlas con la degradación de los materiales y en algunos muros fueron determinadas las resistencias a compresión con un esclerómetro.



Figura 7. Torre del Templo de San Agustín, ubicado en la ciudad de Puebla.

Fuente: Máximo (2017).

La Figura 8 muestra la vista lateral izquierda del Templo de San Agustín y parte de dos muros del patio, donde se observa fuerte degradación de materiales por intemperismo y falta de mantenimiento.



Figura 8. Vista lateral izquierda del Templo de San Agustín y muros del patio.

Fuente: Máximo (2017).

La Figura 9 evidencia detalles de mamposterías combinadas con rocas de diferente tipo e inclusive pedacería de ladrillo rojo común, la superposición de las mismas, en algunos casos, sin confinamiento con mortero. De igual manera, se puede observar la degradación de materiales que han dado origen a patologías por la falta de mantenimiento.



Figura 9. Mamposterías combinadas en muros externos del Templo de San Agustín.

Fuente: Máximo (2017).

El caso del Templo de San Agustín es un ejemplo de cómo su estructura ha sido dañada a lo largo del tiempo por sobrecargas externas, incluyendo la sísmica, el

15 de junio de 1999, su posterior rehabilitación estructural y el comportamiento que tuvo la torre rehabilitada ante el sismo del 19 de septiembre de 2017.

Con respecto a los daños, se tiene información que data de 1863, donde el templo perdió casi la tercera parte de su torre al servir como fortaleza del movimiento armado. La restauración se realizó en 1870 con mezclas muy pobres y errores constructivos en la bóveda del remate de la torre, que no aseguraron su estabilidad, pero sí propiciaron el deslizamiento y el colapso de esa parte de la torre.

El sismo del 15 de junio de 1999 dañó gravemente el templo, aplastando los muros longitudinales en la región de apoyo del contrafuerte, que restringían el movimiento de la torre. Se formaron fisuras y grietas con desprendimiento de aplanados en la parte central de varias bóvedas, en los muros de la nave y en todas las caras de la torre. El peso estimado de la parte colapsada fue de 75 toneladas, de las cuales gran parte del material cayó sobre la bóveda de la primera capilla del templo en la que se desplanta la torre, formando grietas, fisuras y desprendimiento de aplanados en la bóveda de arista. También tuvo afectación, una ménsula de piedra que soportaba la madera sobre la que colgaba la campana principal.

La magnitud del daño que tenía el templo impidió priorizar acciones para su restauración, por lo que se decidió rehabilitar la torre debido al riesgo que representaba la parte que quedó en pie y que no tenía un soporte estructural que garantizara su estabilidad. En la propuesta de intervención se planteó consolidar la torre desde sus cimientos para estabilizarla y la reconstrucción de la parte faltante a través de una estructura espacial con peso ligero. Esta estructura se cubrió reproduciendo todos y cada uno de los elementos del último cuerpo de la torre con materiales diferentes a los originales, para diferenciar la intervención. Su remate fue a través de una cúpula geodésica, utilizando estructuras ligeras y desmontables, fáciles de construir y de transportar. Definida la estructura, se calculó y se modeló con elemento finito para conocer los esfuerzos ejercidos sobre la torre y la parte original de la misma que quedó en pie. Los resultados sirvieron para concluir que los apoyos de la estructura espacial deberían tener juntas de neopreno para amortiguar los esfuerzos de tensión y de torsión, así como tirantes interiores sujetos a los muros del primero y segundo cuerpo de la torre para lograr la homogeneidad del conjunto (Benítez, Fernández, Morales y Lobato, 2017).

En este proyecto de intervención se demostró que era posible restaurar y rehabilitar estructuralmente el patrimonio cultural con materiales y sistemas constructivos contemporáneos, sin alterar su valor intrínseco, pero la solución dependería del tipo de elemento y de su daño, en este caso, la torre.

Durante el sismo del 19 de septiembre de 2017, la torre se comportó satisfactoriamente, lo que demostró que las técnicas de reconstrucción fueron ideales, soportando un sismo de magnitud mayor a la del sismo de Tehuacán. Si las técnicas de reconstrucción dieron buenos resultados, las reparaciones inconclusas y la falta de mantenimiento originaron patologías importantes en sus materiales; por ejemplo, la falta de mantenimiento de la estructura tridimensional de acero que estabiliza la torre, ya muestra patologías por oxidación, como se puede observar en la Figura 10.



Figura 10. Estructura tridimensional que estabiliza la torre del Templo de San Agustín.  
Fuente: Máximo (2017).

Actualmente, el INAH desarrolla el proyecto de intervención del Patrimonio Cultural dañado por el último sismo. El Templo de San Agustín ha sido restaurado y seguirá representando un legado para la humanidad.

En general, los templos antiguos tienen patologías causadas por humedad, y San Agustín no es la excepción. Como parte de la intervención de este templo, se impermeabilizó las bóvedas y las losas, aplicando una mezcla elaborada con nopal, jabón en barra y alumbre, siguiendo un procedimiento específico para su aplicación. La Figura 11 muestra el material de impermeabilización y su aplicación.



Figura 11. Material de impermeabilización y su aplicación en la losa del Templo de San Agustín.

Fuente: Máximo (2017).

Con este ejemplo queda demostrado que en cada templo dañado por sismo, deberá aplicarse técnicas de rehabilitación estructural propias de su configuración, macroelementos dañados, tipo de daño y grado de deterioro de sus materiales.

### 3. Resultados

Este estudio permitió realizar un compendio de información relacionada con los daños en el Patrimonio Cultural del Estado de Puebla, debidos al sismo del 19 de septiembre de 2017. Se observó similitudes en los modos de falla, respecto a los ocurridos en el sismo de Tehuacán, concluyendo que los macroelementos más afectados fueron los cuerpos centrales de la fachada, las bóvedas y las torres. Estos macroelementos tienen un comportamiento dinámico independiente que no afecta la funcionalidad de la estructura a nivel global. Sin embargo, como medida de protección, deberá restringirse el acceso a las zonas donde haya daños.

La Tabla 2 muestra el resumen de daños en el Patrimonio Cultural reportado en el Informe Técnico del Sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999. El CENAPRED realizó la visita a 44 templos. El diario digital e-consulta.COM publicó la información recabada de los daños ocasionados por el sismo del 19 de septiembre de 2017, donde se observa que el número superó a los ocurridos por el primer sismo (Méndez, 2017 y Núñez, 2017).

Tabla 2. Daños en el Patrimonio Cultural reportados por el CENAPRED (Sismo de Tehuacán)

Tipo de Daño	Sismo 1999	Sismo 2017
	Frecuencia	Frecuencia

Agrietamiento en columnas de campanarios	26	27
Agrietamiento en cuerpo central de fachada	25	78
Agrietamiento inclinado en cuerpo de torres	18	37
Daño en linternas	16	4
Agrietamiento en cúpulas	15	30
Agrietamiento en bóvedas	14	54
Agrietamiento en contrafuertes	14	6
Agrietamiento en tambores	12	5
Daño o caída de almenas	10	1
Subtotal	150	242
Fisuras en arcos	No se reportó	30
Fisuras en muros	No se reportó	50
Total	150	322

### 3.1 Análisis de daño y técnicas de rehabilitación (sismo 1999)

Las columnas generalmente se agrietan en su extremo superior, ya sea por tensión directa o por cortante como tensión diagonal. Si en la columna se excede la capacidad de aplastamiento de la mampostería, se formará una articulación en su base. La reparación se podrá hacer por medio de aplanados de mortero y malla, la adición de diafragmas y el aumento local de la sección transversal de las columnas, utilizando grapas de varillas para ligar las pilastras.

Las fallas en las bóvedas y arcos son originadas por la acción de sismos significativos. La inestabilidad se da, cuando existe abertura de los apoyos y se modifica la línea de presiones de su trayectoria original. El uso de tensores de acero en el arranque de las bóvedas y arcos representa una solución adecuada. Cuando estos elementos se agrietan y cambian su geometría, la mampostería se consolida y se refuerza con membranas de mortero y malla, para reintegrar la resistencia original y adicionar capacidad a cortante y a flexión. Se presenta articulaciones en los arcos en forma de agrietamientos, y en el punto más alto del arco, llamado clave, evidencia agrietamientos por tensión directa.

Los agrietamientos en las cúpulas son reparados con membrana de mortero, malla y conectores, siempre y cuando se aplique, por lo menos a la superficie de la cara exterior del elemento a reparar. El desplante de las cúpulas se puede reforzar con zunchos fabricados de placas –solera- en combinación con aplanados de mortero sobre la mampostería, pero son más eficientes las dalas de concreto reforzado.

Las torres de los campanarios son elementos flexibles, cuya relación de esbeltez es del orden 1:4. Un método adecuado de reparación es el colado de diafragmas

de concreto con espesores de 8 a 10 cm en el nivel de piso de cada cuerpo, prolongando el mismo colado por el intradós de los arcos y entre pilastras. Se puede instalar un tensor para reintegrar la torre o las torres con la nave principal (De la Torre, et al., 2004).

Así como se rehabilitó el Templo de San Agustín después de realizar un análisis del daño, de la misma manera deberá analizarse detalladamente, los daños de todos los templos para proponer técnicas adecuadas y materiales que no alteren su valor intrínseco y que les proporcionen mayor seguridad ante movimientos telúricos de magnitud importante.

#### 4. Discusión

El tema del patrimonio cultural dañado por sismo y su rehabilitación es muy amplio, ya que cada templo tiene una configuración estructural particular y materiales de construcción propios de la región. El proyecto de intervención deberá incluir datos históricos del inmueble, que puedan ayudar tanto a comprender el origen del daño, como a proponer la aplicación de pruebas no destructivas, modelos matemáticos y software especializado para su análisis, con el objetivo de proponer las técnicas más adecuadas de rehabilitación. Como complemento, se recomienda registrar vibración ambiental mediante acelerógrafos instalados en puntos estratégicos de la estructura para determinar los periodos y frecuencias de vibrar en las direcciones ortogonales del templo y en elementos como cúpulas, torres, bóvedas, etc., para determinar su comportamiento dinámico a nivel local e identificar las causas de los daños.

La comparación de los resultados de la técnica de vibración ambiental y el método de elementos finitos para determinar periodos y frecuencias de vibrar en cúpulas, torres y bóvedas, entre otros, se puede consultar en el estudio de Máximo (2009), donde se determinó los periodos fundamentales en el Templo del Refugio localizado en el Centro Histórico de la ciudad de Puebla, que sufrió graves daños causados por el sismo del 15 de junio de 1999.

En ese trabajo se determinó que las diferencias en los periodos de vibrar entre la técnica de vibración ambiental y el método de elementos finitos fueron del orden de centésimas y milésimas, lo que convalida los resultados. Sin embargo, estas diferencias pueden ser causadas por lo siguiente:

- La mampostería de las construcciones antiguas es heterogénea y aunque en las hipótesis de análisis se considere homogénea, en la realidad, la respuesta dinámica de la estructura depende de esta condición.



- En el registro de vibración ambiental, la señal considera implícitamente la estructura interna del material de la construcción, y los periodos de vibrar están en función de las ondas que viajan a través de dicha estructura.
- La construcción ya tiene elementos rehabilitados estructuralmente y reparaciones que modifican los períodos de vibrar. Esta información no se refleja en el modelo de elementos finitos.

Es importante mencionar que la intervención del Patrimonio Cultural deberá apegarse, en la medida de lo posible, a las recomendaciones de ICOMOS, asociación responsable de proponer los bienes que reciben el título de Patrimonio Cultural de la Humanidad, siendo su principal objetivo el de promover la teoría, metodología y tecnología aplicada a la conservación, protección y revalorización de monumentos y de sitios de interés cultural.

El Patrimonio Cultural se conservará cuando el mantenimiento sea continuo y la restauración y rehabilitación de los templos dañados sea de forma inmediata, después de un evento sísmico; de no hacerlo, estas estructuras se volverán más vulnerables, pues con el paso del tiempo y la falta de mantenimiento, los materiales se degradan y los elementos estructurales-arquitectónicos siguen perdiendo resistencia, surgiendo patologías de origen biológico, físico y mecánico que, bajo la acción del intemperismo y la contaminación ambiental, afectan más rápido los materiales.

Los materiales utilizados en la intervención deberán ser compatibles con los originales, además de mejorar su desempeño ante una sobrecarga. En el mercado existe una variedad de productos con características especiales para la rehabilitación; por ejemplo, hojas de fibra de carbono y resinas epoxi que poseen alta resistencia a la tensión y aseguran la compatibilidad de deformaciones; son utilizadas en el refuerzo de estructuras a flexión, cortante y compresión; varillas de fibra de carbono embebidas en una matriz de resina epoxi, mortero compuesto por hidróxidos cálcicos y áridos inertes, utilizado para la restauración de fachadas, muros y galerías deterioradas, reparación y sellado de juntas en ladrillo y piedra, relleno en cavidades de paredes y revestimiento de muros de mampostería.

En el tratamiento de humedades capilares presentes en elementos de soporte se puede utilizar mortero microporoso; también, la inyección de resina líquida a base de siloxanos concentrados sin disolventes, que al ser disueltos en agua, se activan formando una microemulsión repelente al agua.

Para la reparación y refuerzo estructural se utiliza, por ejemplo, el mortero monocomponente en sus diferentes presentaciones, dependiendo de la reparación que se necesite hacer: fraguado rápido, tixotrópico y sin retracción para la reparación de concreto y mampostería; morteros de fraguado rápido,

tixotrópico, modificado con polímeros e inhibidores de corrosión y reforzado con fibras sintéticas para la restauración de concreto y mampostería; mortero de reparación estructural modificado con polímeros, humo de sílice y reforzado con fibras sintéticas, entre otros.

## 5. Conclusiones

El Centro Histórico de la ciudad de Puebla tiene templos catalogados por la UNESCO como Patrimonio Cultural –material- y muchos de ellos han sido dañados por sismos. La degradación de los materiales por el paso del tiempo, la falta de mantenimiento, las reparaciones inconclusas, el cambio de uso, las modificaciones estructurales, entre otras, han originado el deficiente comportamiento sísmico de este patrimonio.

En el sureste de México, el movimiento de las placas tectónicas es causa de la constante actividad sísmica, ocurriendo fuertes sismos cuya intensidad ha afectado al Estado de Puebla, sin olvidar los sismos con epicentros locales. En este contexto, es una realidad que seguirá temblando, por lo que las autoridades competentes deberán realizar los proyectos de intervención necesarios para conservar el Patrimonio Cultural de este Estado, aplicando nuevas metodologías, técnicas y materiales, sin alterar sus valores intrínsecos.

La observación de los daños en templos afectados por el sismo de Friuli en Italia, permitió a los investigadores analizar la relación que existe entre el daño y el elemento dañado, para entender su comportamiento sísmico a nivel local y global, identificando patrones de daño en los macroelementos. Una muestra muy clara de macroelementos y su comportamiento independiente es el del Templo de Nuestra Señora de la Merced, ubicado en el Centro Histórico de la ciudad de Puebla, donde como consecuencia del último sismo, la fachada del templo se separó unos centímetros de la bóveda del sotocoro.

Considerando que el patrimonio cultural es parte fundamental de la identidad de una cultura, representa una fuente de información de la evolución histórica de los pueblos; en él se ve inmersos cientos de años, grandes personajes, avances tecnológicos, hechos que han cambiado el curso de la historia, entre otros. Por ello, es fundamental mirar hacia atrás y reconocer su importancia y, en el hoy, realizar un esfuerzo con dedicación para estudiarlo y conservarlo, y de esta manera poder transmitir a las generaciones futuras el mayor conocimiento posible para que ellos continúen con esta ardua e importante tarea.

## 6. Agradecimientos

Al Licenciado Juan Pablo Requena Márquez, estudiante de la Licenciatura en Ingeniería Industrial de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por su valiosa colaboración en la traducción al portugués e inglés del resumen de este artículo.

Al Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), que dio su autorización para realizar estudios en el Templo de San Agustín, sin olvidar al fraile Juan Manuel Sanabria, quien fue el primero en abrir las puertas de este templo a los autores del artículo.

## 7. Conflicto de intereses

Los autores de este artículo declaran no tener ningún tipo de conflicto de intereses sobre el trabajo presentado.

## Referencias

- Alcocer, S., Aguilar, G., Flores, L., Bitrán, D., Durán, R., López, O.,... Mendoza, J. (1999). Informes Técnicos. El sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999. Recuperado de <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/178-INFORMETCNICOELISISMODETEHUACNDEL15DEJULIODE1999.PDF>
- Benítez, A., Fernández, M., Morales, M. y Lobato, M. (2017). Análisis del comportamiento estructural ante la acción de un sismo. El caso del Templo de San Agustín, Puebla, México. Recuperado de <https://digital.cic.gba.gov.ar/bitstream/handle/11746/6675/T3-08.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2001). Programa especial de prevención y mitigación del riesgo de desastres 2001-2006. Recuperado de <http://www.iin.oea.org/boletines/boletin8/publicaciones-recibidas-esp/CENAPRED-MX-Programa-de-prevencion-y-mitigacion-del-riesgo-de-desastres.pdf>
- De La Torre, O., López, R. y Salazar, A. (s.f.). Rehabilitación Estructural de Monumentos Históricos dañados en el Estado de Puebla por el sismo del 15 de junio de 1999. Recuperado de [http://www.smie.org.mx/SMIE\\_Articulos/co/co\\_11/113.PDF](http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_11/113.PDF)
- Dogliani, F., Grimaz, S. y Moretti, A. (2018). How the 1976 Friuli earthquake prompted research into the seismic behavior of historical buildings and the formulating of effective and tailored seismic improvements. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 54(4), 527-542.
- Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). (2014). Lineamientos Institucionales Generales en Materia de Conservación del Patrimonio Cultural. Recuperado de <https://www.normateca.inah.gob.mx/pdf/01472572392.PDF>
- International Council of Monuments and Sites (ICOMOS). (1965). Carta Internacional sobre la conservación y la restauración de monumentos y sitios (Carta de Venecia 1964). Recuperado de [https://www.icomos.org/charters/venice\\_sp.pdf](https://www.icomos.org/charters/venice_sp.pdf)

- La Jornada de Oriente. (2018). A un año del 19-S el patrimonio cultural sigue fracturado con solo 118 edificios restaurados. Recuperado de <https://www.lajornadadeoriente.com.mx/puebla/a-un-ano-del-19s-el-patrimonio-cultural-sigue-fracturado-con-solo-118-edificios-restaurados/>
- Lombillo, I., Villegas, L., Silió, D. y Hoppe, C. (2008). Evaluación no destructiva del patrimonio construido. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/268400786\\_Evaluacion\\_no\\_destructiva\\_del\\_patrimonio\\_construido](https://www.researchgate.net/publication/268400786_Evaluacion_no_destructiva_del_patrimonio_construido)
- Máximo, P. (2009). *Determinación de los periodos fundamentales en las direcciones ortogonales del Templo del Refugio a través de vibración ambiental* (Tesis de Maestría). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Recuperado de <http://www.remeri.org.mx/tesis/INDIXE-TEISIS.jsp?id=oai:tesis.bibliotecas.buap.mx:BAFA20102079>
- Méndez, P. (24 de septiembre de 2017). El antes y después del sismo que cambió el rostro a Puebla. Recuperado de <https://www.e-consulta.com/nota/2017-09-24/sociedad/el-antes-y-despues-del-sismo-que-cambio-el-rostro-puebla>
- Meza, J. (2013). *Metodología con base en macroelementos para la evaluación de resistencia y mecanismos de colapsos de iglesias antiguas de mampostería* (Tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <http://www.ciencianueva.unam.mx/handle/123456789/97>
- Núñez, E. (20 de noviembre de 2017). Detalla el INAH daños en 241 templos en Puebla tras sismo. Recuperado de <https://www.e-consulta.com/nota/2017-11-20/ciudad/atlixco-el-municipio-con-mas-danos-en-monumentos-y-templos>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (1987). Centro Histórico de Puebla. Recuperado de <https://whc.unesco.org/es/list/416>
- Peña, F. (2010). Estrategias para el modelado y el análisis sísmico de estructuras históricas. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (83), 43-63.
- Peña, F. y Lourenço, B. (2012). Criterios para el refuerzo antisísmico de estructuras históricas. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (87) 47-66.
- Presidencia de la República de los Estados Unidos Mexicanos. (1977). Decreto 11-18-77 “por el que se declara una zona de Monumentos Históricos en la ciudad de Puebla de Zaragoza, Estado de Puebla”. Recuperado de [http://gobiernoabierto.pueblacapital.gob.mx/transparencia\\_file/gchpc/2018/77.fracco1.DecretoZonaMonumentosPuebla.pdf](http://gobiernoabierto.pueblacapital.gob.mx/transparencia_file/gchpc/2018/77.fracco1.DecretoZonaMonumentosPuebla.pdf)
- Universidad Nacional Autónoma de México y Servicio Sismológico Nacional (SSN). (s.f.). Reporte Especial. Sismo del día 19 de septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M 7.1). Recuperado de [http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX\\_rep\\_esp\\_20170919\\_Puebla-Morelos\\_M71.pdf](http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170919_Puebla-Morelos_M71.pdf)