

Vibración ambiental registrada en una edificación religiosa del siglo XVIII para determinar sus características dinámicas

Ambient vibration recorded in an 18th century religious edification to determine its dynamic features

Patricia MÁXIMO-ROMERO[✉]*, Rogelio RAMOS-AGUILAR[✉], Víctor GALINDO-LÓPEZ[✉],
Máximo ÁVILA-CRUZ[✉], Gabriela YÁÑEZ-PÉREZ[✉] & Dulce María ROMANO-CANO[✉]

*Autor de correspondencia: patricia.maximo@correo.buap.mx, rogelio.ramos@correo.buap.mx, victor.galindo@correo.buap.mx,
maximo.avila@correo.buap.mx, gabriela.yañez@correo.buap.mx, dulce.romano@alumno.buap.mx

Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México [📍]

Manuscrito recibido: 13 noviembre 2022;

Recibido en formato revisado: 5 enero 2023;

Aceptado: 9 enero 2023

Resumen

Este trabajo presenta el caso de la instrumentación sísmica del templo de Nuestra Señora del Refugio, construido en el siglo XVIII, ubicado en la ciudad de Puebla, México. El templo fue dañado por los sismos de 1864, 1973 y 1999, por lo que ha sido intervenido estructuralmente. Después del sismo de 1999, se registró una vibración ambiental y con un software especializado se procesaron los registros de aceleración para calcular los espectros de Fourier y la Función de Transferencia. A través de los cocientes espectrales en las direcciones horizontales y horizontal sobre vertical, se determinaron las frecuencias y periodos de vibración de algunos elementos estructurales. Posteriormente, se propuso un rango de periodos de vibración estimados en templos coloniales, con los cuales se observó que el porcentaje de periodos de toda la estructura aplicando la técnica Piso/Campo libre que están dentro de ese rango. El cual es mayor para la componente transversal X (flexible), que el porcentaje para la componente longitudinal Y (rígida).

Los archivos corresponden a los que utilizó otro investigador en su tesis doctoral, en la que no se muestra el procedimiento del tratamiento de la señal y modeló el templo con elementos finitos para determinar sus modos de vibración. Los periodos de vibración obtenidos con ambas metodologías fueron muy cercanos. El método de elementos finitos, requiere datos de materiales, geometría, dimensiones, etc. La vibración ambiental sólo registra el movimiento interno de la estructura; por lo tanto, es adecuada para monitorear el comportamiento sísmico de templos.

Palabras clave: mampostería; sismo; templo; cúpula; torre; tambor.

Abstract

This work presents the case of the seismic instrumentation of the church Nuestra Señora del Refugio, built in the eighteenth century and located in the city of Puebla, Mexico. The church has been damaged by the earthquakes of 1864, 1973, and 1999, so it has been structurally intervened. After the 1999 earthquake, an environmental vibration was recorded, and the acceleration records were processed with specialized software to calculate the Fourier spectra and the Transfer Function. Through the spectral ratios in the horizontal and horizontal over vertical directions, it was determined the frequencies and vibration periods of some structural elements. Subsequently, a range of vibrating periods estimated in colonial temples was proposed, with which it was observed that the percentage of periods of the entire structure, applying the Floor/Free field technique that are within that range. It is higher for the transversal component. X (flexible), that the percentage for the longitudinal component Y (rigid).

The files corresponded to those used by another researcher in his doctoral thesis, which does not show the signal processing procedure and modeled the temple with finite elements to determinate its vibration models. The vibrating periods obtained with both methodologies were very close. The finite element method requires data on materials, geometry, dimensions, etc. The environmental vibration only records the internal motion of the structure; therefore, it is suitable for monitoring the seismic behavior of temples.

Keywords: masonry; earthquake; temple; dome; tower; drum.

How to cite this article:

Máximo-Romero, P., Ramos-Aguilar, R., Víctor Galindo-López, V., Ávila-Cruz, M., Yáñez-Pérez, G. y Romano-Cano, D.M., (2022). Vibración ambiental registrada en una edificación religiosa del siglo XVIII para determinar sus características dinámicas.. BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA, 52, pp. 18 - 28. DOI:<https://doi.org/10.15446/rbct.105813>.

1. Introducción

Los templos coloniales en México construidos entre los siglos XVI y XIX poseen diferentes características entre ellos, tales como el tipo de materiales, las dimensiones de sus elementos estructurales, su configuración estructural, entre otras. Por ese motivo, es difícil realizar el análisis de su comportamiento sísmico aplicando métodos convencionales que se sustenten en normas y reglamentos. Debido al valor arquitectónico e histórico que tienen, se aplican pruebas o técnicas que no alteren sus valores intrínsecos.

El templo estudiado se localiza en el estado de Puebla, el cual forma parte de las regiones de baja y mediana sismicidad, cercano a la región de alta sismicidad según el mapa de vulcanismo y sismicidad creado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Algunos sismos con epicentros cercanos a este estado han dejado daños leves, moderados o severos en puentes, edificios modernos, edificaciones esenciales, casa-habitación, etc. En este tipo de estructuras, el análisis de su comportamiento sísmico se puede realizar a través de métodos convencionales que se basan en normas y reglamentos.

El caso de los templos coloniales es particular, pues para realizar un análisis de su comportamiento sísmico y la relación con los daños, la estructura se discretiza en macroelementos. La discretización permite analizar el comportamiento de cada macroelemento en forma local para determinar sus características dinámicas. Una de las técnicas que se aplican es el registro y análisis de vibraciones ambientales, con el objetivo de identificar los macroelementos más rígidos o más flexibles, y relacionarlos con su posible vulnerabilidad a ser dañados por un sismo.

El concepto de macroelemento surgió de las observaciones de los daños causados en iglesias por el terremoto de 1976 en Friuli, Italia. El macroelemento, según [Doglioni et al. \(1994\)](#), representa un elemento estructural donde los patrones de daño más críticos y frecuentes para su estabilidad estarán parcial o completamente presentes. Para entender mejor este concepto, se puede ver como cuestiones numéricas que se definen como partes de una iglesia que tienen un comportamiento estructural autónomo y unitario ante acciones sísmicas. Estas consideraciones son ideales para investigar el daño y la vulnerabilidad local y global de las iglesias ([Lagomarsino, 1998](#); [Casolo et al., 2000](#)). Según [Meza \(2013\)](#), al discretizarlas en macroelementos, se pueden correlacionar los daños y el comportamiento sísmico de fachadas, naves, ábsides, capillas, etc.

El daño por sismo que han tenido los templos coloniales de México está relacionado con las características de la mampostería combinada y no reforzada con la que los construyeron, elaborada con materiales como el adobe, barro, ladrillos y piedras naturales de cada región unidos con morteros pobres de cal-arena. Esto ha dado como resultado una masa heterogénea con propiedades mecánicas no uniformes. El sistema estructural trabaja por gravedad y las acciones externas que actúan sobre él se transmiten como esfuerzos de compresión excéntricos a los elementos

verticales, razón por la cual carece de la capacidad necesaria para resistir esfuerzos de tensión y de cortante significativos como los que se generan durante un sismo. Su comportamiento sísmico también depende de la degradación de los materiales que pierden resistencia por la falta de mantenimiento, el daño acumulado por sismo, la modificación o demolición de elementos estructurales para construir puertas, ventanas, nichos y cubiertas, e inclusive su unión con sistemas constructivos modernos.

En el caso de los templos, la cuantificación de daños después de un sismo inicia con la inspección visual, el reporte fotográfico y un preliminar de daños según las observaciones. Posteriormente, se diseña un proyecto de intervención en el que se incluyen datos históricos (periodo de construcción, materiales, sismos que causaron deterioros, tipo de daños, modificaciones estructurales, etc.). Después, con estos datos se propone aplicar pruebas o técnicas no destructivas para diagnosticar su salud estructural (patologías, pérdida de resistencia, etc.). Luego, para la restauración se definen los materiales que sean compatibles con los originales y las técnicas apropiadas para la rehabilitación estructural, según sea el elemento y su tipo de daño. Algunas de las pruebas no destructivas que se aplican a las estructuras sin causarles algún daño físico son: velocidad de pulso de sonido, tomografía sónica, esclerometría, registro de vibración ambiental, entre otras.

Una de las pruebas no destructivas usadas para determinar las características dinámicas de estructuras es el registro de vibración ambiental generada por viento, oleaje y actividades humanas. Esta prueba tiene ventajas sobre el registro de sismos fuertes, ya que la instrumentación es temporal y económica, no interviene en las actividades de los usuarios de los inmuebles, los resultados son confiables y se obtienen a corto plazo. Las estructuras se instrumentan en puntos estratégicos con acelerógrafos que registran esa vibración o la generada por disparos (golpes) que hacen vibrar la estructura. De acuerdo con [Esquivel y Schimdt \(2016\)](#), los patrones de vibración de un edificio son complejos, por lo que se descomponen en modos de vibración más sencillos que, superpuestos, conforman la forma final en que vibrará la estructura. Cada uno de estos modos está definido por medio de tres parámetros: periodo natural (T), amortiguamiento (β) y forma modal.

Las características de los templos en cuanto a los materiales, configuración estructural y su forma autónoma de vibrar requieren pruebas o técnicas con las que se pueda estimar su comportamiento sísmico. El registro de vibración ambiental y el procesamiento de la señal almacenada en acelerógrafos es una prueba o técnica no destructiva que se aplica para obtener frecuencias y periodos de vibración en elementos estructurales de los templos. El tratamiento de los acelerogramas permite calcular y ver gráficamente los espectros de Fourier y la Función de Transferencia, con la que se obtienen las características dinámicas de las estructuras. Esta técnica es útil para calibrar modelos numéricos, por ejemplo, el elemento finito en el que la estructura se discretiza en mallas muy finas formadas por elementos finitos de geometría simple, en cuyo interior se

establecen funciones de interpolación sencillas. Los resultados que arroja el método son esfuerzos, deformaciones, desplazamientos, etc., con una precisión que depende de la cantidad de nodos, del tamaño y tipos de elementos por malla, entre otros.

El procesamiento de la señal registrada se realiza con un software especializado en el que, a través de ventanas, se pueden ver los acelerogramas y tratarlos adecuadamente para identificar las frecuencias de corte de la señal que muestran la mayor intensidad de la vibración con el objetivo de calcular las variables indicadas. También, existen documentos que indican que las pruebas de vibración ambiental se han utilizado para la evaluación de las propiedades dinámicas de estructuras sometidas ante cargas de oleaje (Aillapan y Boroschek, 2012), en monumentos históricos (Meli, 2011) según (Morales, 2017) y en la evaluación de las condiciones de servicio de puentes peatonales (Hernández et al., 2014; Hernández et al., 2016; Hernández et al., 2021). En el caso de los templos coloniales, es escasa la literatura relacionada con el registro de vibración ambiental para determinar frecuencias y periodos de vibración, pero a continuación se mencionan algunos estudios:

En noviembre de 2001 se realizaron mediciones de ruido sísmico ambiental en el interior de la Catedral de Colonia, Alemania, para evaluar sus frecuencias de vibración y comprobar si éstas se encontraban dentro del rango de amplificación del suelo (Fäcke et al., 2006). Si ese fuera el caso, los daños podrían incrementarse ante la ocurrencia de un terremoto. Las mediciones se realizaron en la bóveda a una altura de 44,7 m por encima de la nave (estación 3), al norte (estación 6) y al sur del crucero (estación 7) y en el coro (estación 10), entre otros. Cada registro se dividió en ventanas de 60 s. Los datos se procesaron mediante dos métodos H/V y el cociente entre la componente horizontal NS y EO grabadas simultáneamente dentro de la catedral y en el sótano (Fäcke et al., 2006).

La Catedral de México está construida sobre suelo blando y ha sido dañada por diferentes eventos sísmicos. Los suelos en los que se desplanta y su riqueza por ser Patrimonio Cultural ha exigido la elaboración de estudios para tomar decisiones sobre su rehabilitación. En 1997 se instaló una red de acelerógrafos de alta resolución, modelo K2 (Kinematics), con canales en las tres direcciones ortogonales para monitorear su comportamiento sísmico. La red registró 16 eventos sísmicos de los cuales se obtuvieron los espectros de respuesta de aceleraciones y se concluyó que el movimiento del sitio tiene un periodo natural de vibración de 2.6 s mayor que el periodo natural de la estructura de la catedral (0.4 s) y en la cúpula se observó un periodo de 0.15 s, entre otros resultados (Meli-Piralla et al., 2001).

En el Exconvento Franciscano de Tecamachalco se registró una vibración ambiental en los puntos estratégicos del centro de la torre del campanario (base de los cuerpos 1, 2 y 3), sobre bóvedas (2, 3, 4 y el altar mayor) y algunos otros elementos. La señal se registró en un acelerómetro triaxial BASALT marca KINEMATRICS, el procesamiento se realizó con el software Geopsy calculando los espectros de

amplitudes de Fourier y los Cocientes Espectrales para obtener los periodos y las formas modales en cada punto. En este trabajo se presentan resultados de periodos de vibración en las direcciones transversales (N-S), longitudinales (E-W) y verticales (Z) (Ramos, 2015).

Del comportamiento sísmico del Templo de San Agustín en Morelia, Michoacán se obtuvieron de manera aproximada las propiedades dinámicas mediante las mediciones de vibraciones ambientales en los puntos más altos de las torres y la nave. Para la nave se obtuvo el periodo natural de 0.42 s y para la torre principal de 0.68 s (Núñez et al., 2016).

Existen registros de la sismicidad histórica de Puebla, en los que se tienen documentados eventos que causaron severos daños a los templos, incluyendo colapsos de cúpulas y torres. También, se dan a conocer algunos datos de las rehabilitaciones y del análisis de las causas que originaron los daños. Los sismos del 15 de junio de 1999 y del 19 de septiembre de 2017, cuyas características se pueden consultar en la página del Servicio Sismológico Nacional de México (SSN), causaron daños a diversos tipos de estructuras, principalmente, templos construidos en el periodo señalado. Los daños más frecuentes fueron fisuras y agrietamientos en torres, arcos, naves y cúpulas (incluyendo colapsos totales).

El caso que se presenta a continuación corresponde al registro de vibración ambiental en la Parroquia de Nuestra Señora del Refugio. Su construcción dio inicio en 1747, se ubica en la avenida 30 poniente no. 505 en la Colonia Santa María, Puebla, Pue., situada al norte del Centro Histórico de la capital de Puebla. Este templo ha sido dañado por sismos ocurridos desde la época virreinal. Máximo y Lozano (2009) destacan la acción de tres eventos sísmicos, uno en el siglo XIX y dos en la última parte del siglo XX. En el sismo de 1864, la cúpula principal fue reconstruida y se reforzaron las esquinas del crucero, construyendo contrafuertes, con excepción de la esquina noroeste. En el Manual de Procedimientos del Patrimonio Monumental de Puebla para efectos de sismo (Gerencia Centro Histórico y Patrimonio Cultural, 2016), se da a conocer que las torres desaparecieron para siempre y que la cúpula fue destruida enteramente. En el sismo del 28 de agosto de 1973, el sismo ocasionó daños severos en el tambor y fisuras en la cúpula principal. En el sismo del 15 de junio de 1999, el sismo ocasionó grietas y fisuras en la nave, grietas verticales en los muros norte y poniente del cuerpo principal de la torre entre otros daños. Según Máximo y Lozano (2009) el templo tuvo modificaciones como: la demolición de un muro transversal, la apertura de vanos para puertas en los muros, etc.

El objetivo de este trabajo es dar a conocer el procesamiento de registros de vibración ambiental para determinar los periodos naturales en las direcciones ortogonales del templo, así como la identificación de los elementos vulnerables a través de sus periodos de vibración. El software utilizado calculó los espectros de Fourier y la Función de Transferencia para los elementos estructurales instrumentados. Posteriormente, se calcularon los cocientes espectrales aplicando la técnica Piso/Campo libre de las direcciones horizontales y H/V (horizontal sobre vertical).

Además, se pretende contribuir al conocimiento de la aplicación de una prueba no destructiva que se pueda incluir en un proyecto de intervención. En la literatura sólo se menciona de forma escueta o resumida, el procesamiento de la señal, pero sin dar más detalles. En este artículo se da a conocer todo el procesamiento de la señal registrada para determinar frecuencias y periodos de vibración, sirviendo de referencia para estudios posteriores.

2. Marco teórico

Las vibraciones generadas por diferentes fuentes están compuestas de señales sinusoides del tipo $s(t) = a \cos(2\pi\omega t)$ o $s(t) = a \sen(2\pi\omega t)$ como las que provienen de sismos o vibración ambiental, donde a es la amplitud de la onda y ω es la frecuencia angular, siendo su periodo $T = \frac{1}{\omega}$. La señal almacenada en acelerógrafos que registran la vibración en suelos y estructuras está en el dominio del tiempo, pero es más fácil analizarla en el dominio de la frecuencia.

Para pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia se aplica la Función de Transferencia definida como un modelo matemático aplicado a funciones lineales, qué, a través de un cociente relaciona la respuesta de un sistema y transforma una señal de entrada en una señal de salida invariante en el tiempo. Su expresión matemática en el dominio de la frecuencia es:

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \quad (1)$$

Donde $X(\omega)$ e $Y(\omega)$ son las Transformadas de Fourier de las señales $x(t)$ e $y(t)$, respectivamente y $H(\omega)$ la Transformada de Fourier de la Función de Transferencia $h(t)$, según (Espinoza, 1999).

La Transformada de Fourier está en función de la frecuencia y para determinar los periodos de aplicación de la ecuación:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2)$$

Donde el periodo T es el tiempo necesario para dar una oscilación completa.

La relación entre la frecuencia natural f y la frecuencia angular ω está dada por:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3)$$

Entonces, el periodo T está dado por:

$$T = \frac{1}{f} \quad (4)$$

Los programas de cómputo que se usan para analizar señales vibratorias, también realizan los cálculos

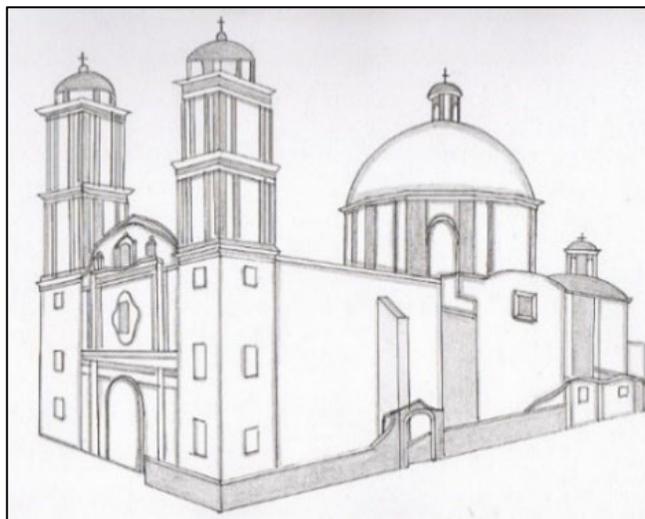


Figura 1. Vista general del Templo del Refugio. Interpretación gráfica por Gómez, M. (2021).

Fuente: Iglesia de Nuestra Señora del Refugio. Vista de conjunto. Mediateca INAH.

correspondientes para pasar de un dominio a otro, mostrando gráficamente los resultados después de procesar la señal realizando correcciones, filtros, etc. El pico más alto de la gráfica de la Función de Transferencia muestra la frecuencia natural del sistema. El periodo natural se obtiene aplicando el recíproco a la frecuencia natural.

3. Materiales y métodos

Los registros fueron una aportación del Dr. Javier Lermo Samaniego, quien instrumentó el templo con un acelerógrafo K2 Header de 6 canales, versión 1.40, número de serie 1309, batería principal de 11.10 V, registrando 100 muestras por segundo, el pre-evento de 2 segundos y el post-evento de 2 segundos, con una duración de 92 s. La lectura de los tiempos fue controlada por un GPS integrado. Se obtuvieron 66 registros generados entre las 17:14 y las 19:09 horas, el procesamiento de las señales se llevó a cabo con el programa DEGTRA (Ordaz et al., 2005).

En la Tabla 1 se muestra el código establecido para la identificación de los registros. La aceleración se registró de acuerdo al siguiente orden: Canal 1 → X (K-2), Canal 2 → Z (K-2), Canal 3 → Y (K-2), Canal 4 → X (FBA), Canal 5 → Y (FBA), Canal 6 → Z (FBA). K-2 representa al sensor principal y FBA al sensor externo. La Figura 1., muestra las fachadas principal y lateral del Templo del Refugio.

Las dimensiones estimadas del inmueble son de 29.0 metros de largo por 10.30 metros de ancho, en la zona de las bóvedas la altura es de 11.50 metros y 20.0 metros en la zona de la cúpula principal. Del lado del evangelio se localiza la casa parroquial y sobre la avenida 30 poniente, el baptisterio en el que se aprecia una pequeña cúpula con linternilla y un cupulín, construido en el siglo XX. La Figura 2. muestra un bosquejo de la planta arquitectónica del templo con la posición de los sensores, principal y externo.

Tabla 1.
Código para la identificación de los registros.

Elemento	Punto	Disparo	Registro	Hora local aprox.
Campo libre	1	D1	MH001.EVT	17:14
		D2	MH002.EVT	17:43
		D3	MH003.EVT	17:45
Nave	2	D1	MI001.EVT	18:08
		D2	MI002.EVT	18:09
Cubierta presbiterio	3	D1	MJ001.EVT	18:23
Cúpula camarín	4	D1	MK001.EVT	18:29
Tambor cúpula principal	5	D1	ML001.EVT	18:37
			MM001.EVT	18:48
Torre norte	7	D1	MN001.EVT	18:56
Azotea parroquia	8	D1	MO001.EVT	19:09

Fuente:

Templo del Refugio

Croquis de Planta Arquitectónica con Acelerógrafos

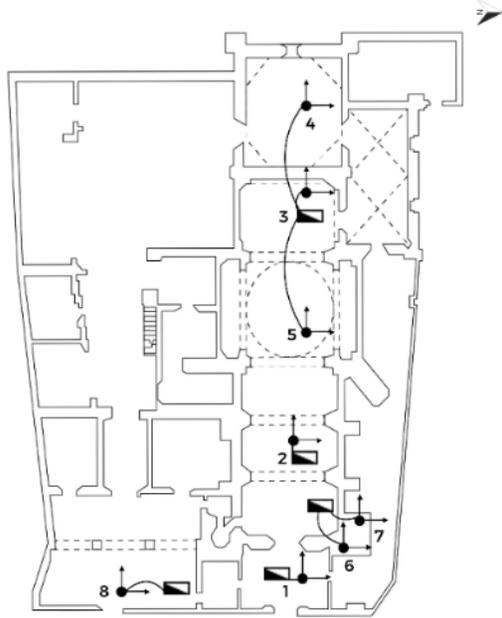


Figura 2. Croquis de la planta arquitectónica con la ubicación de los sensores. Editada por Soto, H. (2021).

Fuente: INAH

3.1. Procesamiento de los registros

Como ejemplo del procesamiento de la señal registrada se consideró el cociente ML001.005/MH003.005, que corresponde a la Función de Transferencia obtenida de los registros en el tambor de la cúpula principal y el campo libre, ambos almacenados en el canal 5, en la dirección Y (longitudinal). ML001.005 se registró del disparo 1 y MH003.005 se registró del disparo 3. A continuación, se describe el procedimiento que se realizó para tratar a las señales de esos registros.

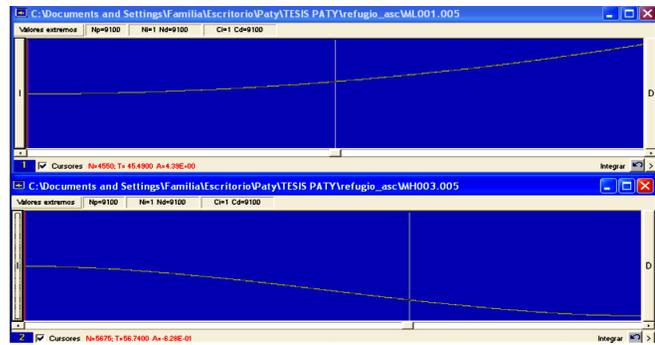


Figura 3. Primera revisión de desplazamientos.

Cada registro de aceleraciones se abre aplicando un delta-t igual a 0.01 corrigiendo la línea base e integrando dos veces para revisar si los desplazamientos son cero o no lo son. La Figura 3 muestra la gráfica obtenida del procedimiento descrito, donde se observa un desequilibrio.

Quando los desplazamientos no son nulos, es decir, la gráfica no es horizontal, entonces, los registros se abren en ventanas nuevas, como se muestra en la Figura 4, iniciando el procesamiento. La Figura 5 muestra la Intensidad de Arias, la cual define la zona de mayor contenido energético de la vibración y en la Figura 6 se muestra el cálculo de la misma intensidad con los puntos de corte que definen la zona que se analizará en el acelerograma. Se aplicó un filtro pasabaja de 60 Hz, frecuencia nominal del sensor. El suavizado del espectro de Fourier fue de 2 para que tuviera mejor legibilidad, sin perder su contenido de frecuencias. La identificación de la zona de ruido sirvió para seleccionar la frecuencia de corte, tal como se muestra en la Figura 7.

En la Figura 8 se muestran los registros filtrados con un pasabaja a partir de la frecuencia de corte. Posteriormente, se calcularon nuevamente los espectros de Fourier, revisando los desplazamientos y las aceleraciones. En la gráfica se observa que los acelerogramas están en equilibrio y los espectros de Fourier están corregidos. Al integrar dos veces los registros de aceleración corregidos se observa que los desplazamientos fueron cero y los espectros de Fourier idénticos a los anteriores. Las gráficas que se muestran en la Figura 9 representan señales tratadas correctamente. La Figura 10 muestra la historia de aceleraciones, observando que el registro tiene las mismas características que las del original y están listos para calcular la Función de Transferencia.

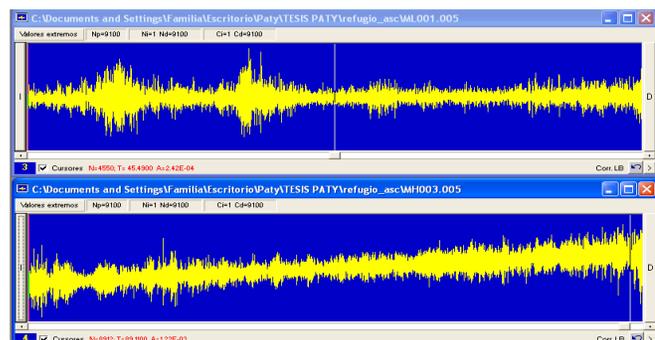


Figura 4. Registros originales de aceleración.

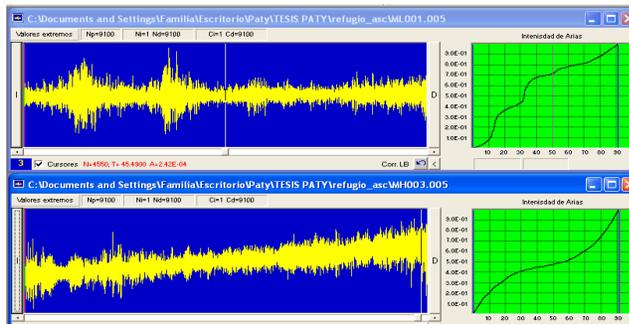


Figura 5. Registros originales de aceleración.

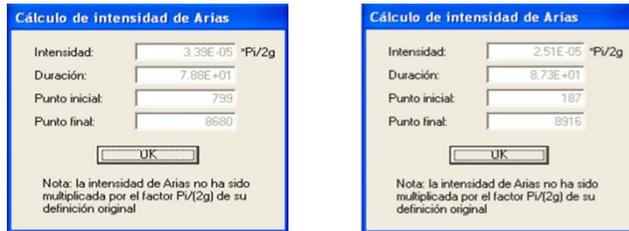


Figura 6. Punto inicial y punto final que delimitan el mayor contenido energético.

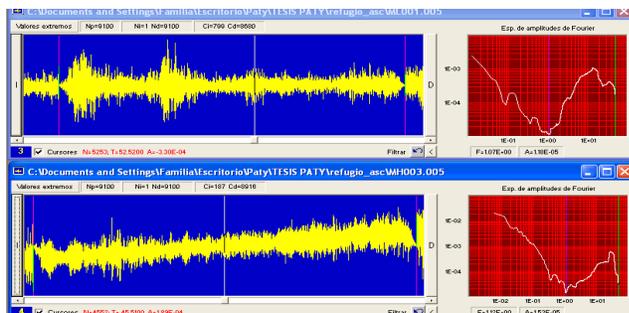


Figura 7. Espectros de Fourier donde se muestran las frecuencias de corte.

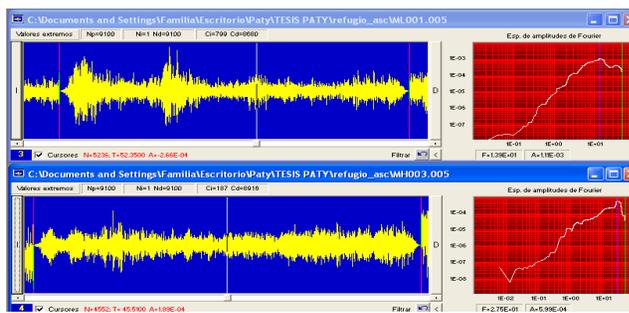


Figura 8. Espectros de Fourier corregidos.

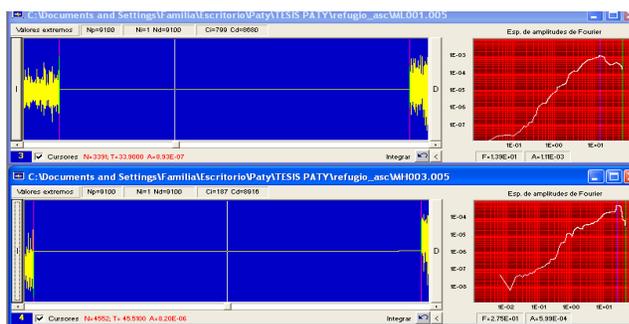


Figura 9. Desplazamientos horizontales (equilibrio estático).

Con los últimos registros se calculó la Función de Transferencia ML001.005/MH003.005 obteniendo la gráfica de la Figura 11. Cuyo pico más alto representa el valor de la frecuencia natural y posteriormente se calculó el periodo natural. Según la gráfica, la frecuencia fundamental en el tambor de la cúpula principal de los registros almacenados en el canal 5 en la dirección Y (longitudinal) de los disparos 1 y 3, respectivamente, es de 6.68 Hz y el periodo natural de 0.1497 s. En el tambor de la cúpula principal se obtuvieron tres Funciones de Transferencia a través de un disparo sobre la cúpula y tres en campo libre. La frecuencia natural y su correspondiente periodo se obtuvieron con el promedio que se muestra en la Tabla 2.

De los pocos estudios que se han realizado de vibración ambiental en templos coloniales mexicanos, se presentan algunos resultados: en la Catedral de México, el periodo natural de la estructura es 0.4 s y en la cúpula 0.15 s; en el

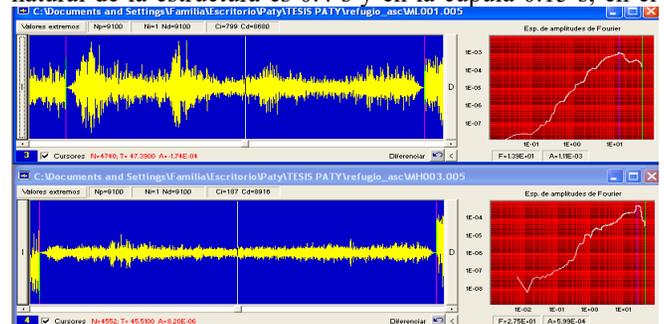


Figura 10. Registros de aceleración corregidos.

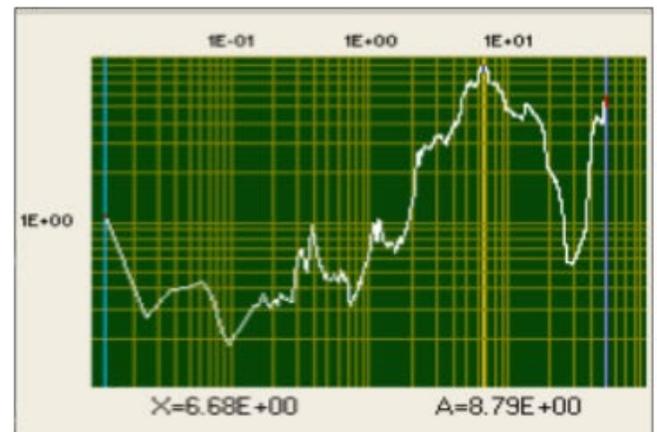


Figura 11. Función de Transferencia de los registros ML001.005/MH003.005.

Tabla 2. Promedio de las Funciones de Transferencia en el tambor de la cúpula principal.

Componente longitudinal	Frecuencia f (Hz)	Periodo T (s)
ML001.005/MH001.005	5.4700	0.1828
ML001.005/MH002.005	6.6500	0.1503
ML001.005/MH003.005	6.6800	0.1497
Promedio	6.2150	0.1609

Templo de San Agustín en Morelia, Michoacán, en la nave se obtuvo el periodo natural de 0.42 s y en la torre principal de 0.68 s. Meza (2013) realizó un análisis modal en una iglesia de Oaxaca (200 modos) y en una iglesia de Puebla (300 modos), el periodo del primer modo de la iglesia de Oaxaca fue de 0.1554 s y el correspondiente para la iglesia de Puebla fue de 0.3956 s. Como las estructuras de los templos coloniales tienen incertidumbres en su forma de vibrar debido al tipo de materiales, configuración estructural, esfuerzos residuales, etc., en este trabajo se decidió aplicar un rango conservador de 0.1 s a 0.5 s.

4. Resultados

La Tabla 3 muestra los porcentajes que están dentro del rango seleccionado para templos típicos construidos entre los siglos XVI y XIX, y los periodos naturales en los puntos más representativos del templo. En esta tabla, se muestran los periodos obtenidos después de procesar las señales en las

direcciones ortogonales X y Y aplicando la técnica de los cocientes espectrales Piso/Campo libre.

La Tabla 4 muestra que el porcentaje de periodos de toda la estructura aplicando la técnica Piso/Campo libre que están dentro de los límites propuestos, es mayor para la componente transversal X, identificándola como la dirección más flexible, pues el periodo de la componente longitudinal Y es menor.

La Tabla 5 muestra los periodos obtenidos después de procesar las señales en las direcciones ortogonales X y Y aplicando la técnica H/V. Todos los periodos están dentro de los límites propuestos, excepto el de la cúpula del camarín (4) en la dirección X, donde el periodo está completamente fuera de los límites establecidos en el 100% de los procesamientos. En la dirección Y, se observa que en el 100% de los procesamientos de los registros en la misma cúpula, el periodo también está completamente fuera de los límites propuestos.

Tabla 3. Resumen de los periodos y frecuencias naturales calculadas con los cocientes espectrales Piso/Campo libre.

Elemento	Promedio de cocientes espectrales (piso sobre campo libre)					
	% dentro del rango	Componentes transversales X (1) y X (4)		% dentro del rango	Componentes longitudinales Y (3) e Y (5)	
		T (s)	f (Hz)		T (s)	f (Hz)
Nave (2)	75	0.3531	2.8320	33.33	0.2298	4.3516
Cúpula del camarín (4)	83.33	0.1457	6.8634	83.33	0.1431	6.9881
Tambor de la cúpula principal (5)	100	0.2249	4.4464	50	0.1609	6.2150
Nave (6)	83.33	0.2016	4.9603	50	0.1500	6.6666
Torre norte (7)	83.33	0.1785	5.6022	50	0.2769	3.6114

Tabla 4. Resumen de los periodos y frecuencias naturales calculadas con los cocientes espectrales Piso/Campo libre.

No. de cocientes procesados	Cocientes espectrales Piso/Campo libre	Promedio		No. de periodos eliminados	Promedio		% de periodos dentro del rango	Promedio total T (s)
		T (s)	f (Hz)		T (s)	f (Hz)		
24	X (1) / X (1)	5.9261	0.1687	11	0.2012	0.1687	67	0.2251
24	X (4) / X (4)	2.7565	0.3627	5	0.2491	4.0144		
24	Y (3) / Y (3)	3.8329	0.2609	15	0.1791	5.5834	50	0.1788
24	Y (5) / Y (5)	7.1429	0.1399	9	0.1787	5.5959		

Tabla 5. Resumen de los periodos y frecuencias naturales calculadas con el cociente espectral H/V.

Elemento	Promedio de cocientes espectrales H/V					
	% dentro del rango	Componentes transversales X (1) y X (4)		% dentro del rango	Componentes longitudinales Y (3) e Y (5)	
		T (s)	f (Hz)		T (s)	f (Hz)
Nave (2)	75	0.3617	2.7647	50	0.3694	2.7070
Cúpula del camarín (4)	100	1.0360	0.9652	100	3.8285	0.2611
Tambor de la cúpula principal (5)	100	0.2419	4.1339	100	0.2055	4.8661
Nave (6)	100	0.2685	3.7243	100	0.2612	3.8284
Torre norte (7)	100	0.2908	3.4387	100	0.3696	2.7056

Tabla 6. Resumen de los periodos y frecuencias naturales calculados con el cociente espectral H/V.

No. de cocientes procesados	Cocientes espectrales H/V	Promedio		No. de periodos eliminados	Promedio		% de periodos dentro del rango	Promedio total T (s)
		T (s)	f (Hz)		T (s)	f (Hz)		
8	X (1) / Z (2)	1.1625	0.8602	3	0.2571	3.8895	68.75	0.2886
8	X (4) / Z (6)	3.4236	0.2920	2	0.3201	3.1240		
8	Y (3) / Z (2)	1.9232	0.8380	3	0.2822	3.5435	56.25	0.2769
8	Y (5) / Z (6)	8.7581	0.1141	4	0.2717	3.6805		

La **Tabla 6** muestra que el porcentaje de periodos de toda la estructura aplicando los cocientes espectrales H/V que están dentro de los límites propuestos, es mayor para la componente transversal X, identificándola como la dirección más flexible, pues el periodo de la componente longitudinal Y es menor.

La principal aportación de este trabajo es dar a conocer los periodos naturales en las direcciones ortogonales del templo, así como la identificación de los elementos vulnerables a través de sus periodos de vibración. La **Tabla 7** muestra los periodos correspondientes a ambas técnicas y las condiciones de flexibilidad o rigidez para cada elemento.

4.1 Periodos obtenidos agrupando todos los puntos situados en la azotea de la bóveda principal

En los puntos 2, 3 y 6, que se encuentran a la misma altura, predominan los periodos de la componente transversal, aplicando la técnica Piso/Campo libre. Los periodos de la nave (punto 2) y de la cubierta del presbiterio (punto 3) son los más largos, 0.35 s y 0.37 s, respectivamente. Estos resultados son consistentes con la configuración estructural y geométrica del templo, dado que la mayor rigidez en esta zona la proporcionan los muros

longitudinales. El periodo en la nave (punto 6) es menor (0.20 s) resultando en una rigidez mayor en esa zona por la cercanía a los muros longitudinal del lado norte y transversal de la fachada. La técnica H/V no arroja resultados que puedan definir la dirección más flexible. El promedio de los periodos de vibración aplicando la técnica Piso/Campo libre en la dirección transversal es 0.30 s.

El promedio de los periodos de vibración de la nave (puntos 2 y 6) es 0.27 en la dirección transversal aplicando la técnica Piso/Campo libre y aplicando la técnica de H/V en la misma dirección es de 0.31.

4.2 Periodos obtenidos agrupando todos los puntos situados en la azotea de la bóveda principal, incluyendo las cúpulas

Considerando los puntos 2, 3, 4, 5 y 6, con la técnica Piso/Campo libre se define la dirección transversal como la más flexible con periodo de 0.258 s y la longitudinal como la más rígida con periodo de 0.166 s. Con la técnica de H/V, sin incluir la cubierta del presbiterio (punto 3) y la cúpula del camerín (punto 4), el periodo es 0.29 s en la dirección transversal, lo que la identifica como la más flexible.

Tabla 7. Periodos y frecuencias naturales calculados con las técnicas de cocientes espectrales (Piso/campo libre) y H/V.

Elemento	Componente	Cocientes espectrales Piso/Campo libre			Cocientes espectrales H/V		
		% de periodos dentro del rango	T (s)		% de periodos dentro del rango	T (s)	
Nave (punto 2)	Transversal	75	0.35	Flexible	75	0.36	Rígida
	Longitudinal	33.33	0.23	Rígida	50	0.37	Flexible
Cubierta presbiterio (punto 3)	Transversal	16.66	0.37	Flexible	0	—	—
	Longitudinal	50	0.15	Rígida	0	—	—
Cúpula camerín (punto 4)	Transversal	83.33	0.15	Flexible	0	1.03	Flexible
	Longitudinal	83.33	0.14	Rígida	0	3.83	Rígida
Tambor cúpula principal (punto 5)	Transversal	100	0.22	Flexible	100	0.24	Rígida
	Longitudinal	50	0.16	Rígida	100	0.21	Flexible
Nave (punto 6)	Transversal	83.33	0.20	Flexible	100	0.27	Rígida
	Longitudinal	50	0.15	Rígida	100	0.26	Flexible
Torre norte (punto 7)	Transversal	83.33	0.18	Rígida	100	0.29	Rígida
	Longitudinal	50	0.28	Flexible	100	0.37	Flexible
Azotea parroquia (punto 8)	Transversal	33.33	0.26	Flexible	100	0.26	Flexible
	Longitudinal	50	0.15	Rígida	100	0.23	Rígida

4.3 Periodos en la torre norte

En la torre norte predomina los periodos de vibración en la dirección longitudinal, siendo para la técnica de Piso/Campo libre de 0.28 y para la técnica de H/V 0.37 s. La magnitud de estos periodos se justifica debido a la altura en la que se registró la señal y que fue mayor que en los otros puntos.

La técnica Piso/Campo libre muestra que el elemento más rígido es la cúpula del camerín (0.15 s) en la dirección transversal, mientras que la nave (punto 2) y la cubierta del presbiterio son los más flexibles (0.35 s y 0.37 s) en la misma dirección. Al tener diferentes periodos de vibración, estos

elementos podrían tener un comportamiento autónomo durante un sismo. La técnica de H/V muestra que el tambor de la cúpula principal y la azotea de la parroquia son los elementos más rígidos, mientras que la nave (punto 2) y la torre norte son los elementos más flexibles en la dirección longitudinal (0.37 s).

La técnica de los cocientes espectrales Piso/Campo libre muestra que el periodo natural de vibración del Templo del Refugio es de 0.2657 s en la dirección transversal y de 0.166 s en la dirección longitudinal. Esta técnica resultó ser la más consistente en los resultados que la técnica H/V.

5. Discusión

La técnica de los cocientes espectrales Piso/Campo libre resultó ser la más consistente en los resultados que la técnica H/V, puesto que se incluyen los puntos 2, 3, 4, 5 y 6. Sin embargo, con la técnica H/V, sin incluir la cubierta del presbiterio (punto 3) y la cúpula del camerín (punto 4), el periodo es 0.29 s en la dirección transversal lo que la identifica como la más flexible.

Ambas técnicas muestran que predomina la flexibilidad en la dirección transversal. Aunque en la técnica H/V, los periodos en ambas direcciones son iguales, pero hay que tomar en cuenta que se procesaron 96 registros aplicando la técnica de los cocientes espectrales Piso/ Campo libre y 32 registros aplicando los cocientes espectrales H/V. En la que casi el 100% de los registros arrojaron periodos dentro de los límites propuestos.

Los periodos obtenidos en este trabajo se compararon con los de vibración ambiental y el modelo de Elemento Finito (Máximo y Lozano, 2009). La Figura 12 muestra una vista en planta del primer modo natural de vibración del modelo completo analizado con el método de Elemento Finito, en donde las diferencias del orden son de centésimas de segundo como se puede observar en la Tabla 8. Esto demuestra que los resultados tienen buena aproximación y que la vibración ambiental es una fuente de información confiable para

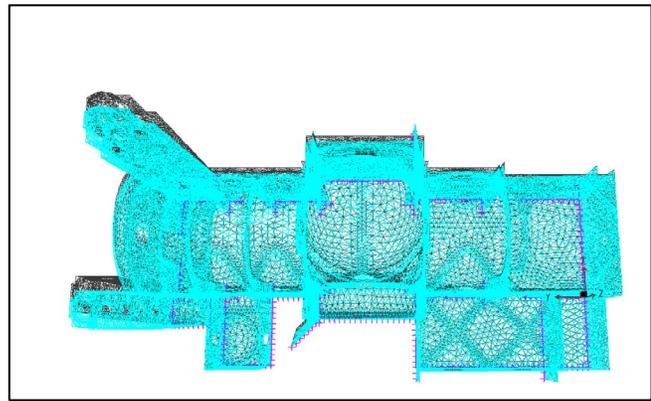


Figura 12. Primer modo natural de vibrar.

obtener periodos y frecuencias naturales. El doble procesamiento de los registros sirvió para saber si existían errores significativos en el tratamiento de la señal que pudieran influir en los resultados.

La Tabla 9 muestra un resumen de las diferencias de los periodos obtenidos según Máximo y Lozano (2009). En esta tabla se observa que los resultados tienen una buena aproximación y que la aplicación de vibración ambiental es una técnica adecuada para calibrar modelos de Elemento Finito.

Tabla 8. Diferencias obtenidas en los trabajos

Cocientes espectrales H/V	Vibración ambiental		Diferencia	Vibración ambiental Elemento Finito		Diferencia
	Lozano	Máximo		Máximo	Lozano	
Bóveda dirección transversal	0.29	0.275	0.015	0.275	0.2908	0.0158
Bóveda dirección longitudinal	0.28	0.15	0.13	0.15	0.2776	0.1276
Torre norte dirección transversal	0.35	0.29	0.06	0.29	0.2946	0.0046
Técnica L/L y T/T						
Torre norte dirección transversal	0.33	0.18	0.15	0.18	0.2946	0.1146
Torre norte dirección longitudinal	0.28	0.28	0.00	0.28	0.3011	0.0211
Azotea parroquia dirección transversal	0.27	0.26	0.01	0.26	—	—
Azotea parroquia dirección longitudinal	0.14	0.15	0.01	0.15	—	—
Bóveda dirección transversal	0.2273	0.258	0.0307	0.258	0.2908	0.0328
Bóveda dirección longitudinal	0.1849	0.166	0.0189	0.166	0.2776	0.1116

Fuente: (Máximo y Lozano, 2009)

Tabla 9. Resumen de las diferencias obtenidas en los trabajos

Técnica H/V	Vibración ambiental	Elemento Finito
Dirección transversal	0.0375	0.0102
Dirección longitudinal	0.13	0.1276
Técnica de los cocientes espectrales	Vibración ambiental	Elemento Finito
Dirección transversal	0.063	0.0737
Dirección longitudinal	0.0096	0.0663

Fuente: (Máximo y Lozano, 2009).

6. Conclusiones

La mampostería de las construcciones antiguas es heterogénea y aunque en las hipótesis de análisis se considere homogénea, en la realidad, su respuesta dinámica depende de esta condición. La aplicación de las dos metodologías dio

como resultado unas aproximaciones de la respuesta real de la estructura., ya que, en los registros de vibración ambiental la señal considera implícitamente la estructura interna del material de la construcción y los periodos de vibración están en función de las ondas que viajan a través de dicha estructura. Por otra parte, el templo ya tiene elementos

rehabilitados estructuralmente y reparaciones que modifican los períodos de vibración cuando se hacen modelaciones matemáticas que se basan en la geometría de la estructura, pero que no consideran detalladamente el tipo de materiales y las modificaciones estructurales.

Los resultados obtenidos en las tablas 8 y 9 permiten concluir lo siguiente: demostrar que la técnica de vibración ambiental es económica y proporciona resultados confiables a corto plazo, pues los registros se obtienen fácilmente en diferentes puntos del sistema estructural a cualquier hora del día. Cabe señalar que los sensores que cuentan con un mayor número de canales, permiten monitorear con mayor aproximación los elementos estructurales.

A través de la calibración con el modelo de Elemento Finito se pudo comprobar que las técnicas aplicadas en este trabajo son válidas y los periodos están dentro del rango para construcciones antiguas con características similares a las del templo.

Este trabajo da inicio a la elaboración de una base de datos para monitorear el comportamiento sísmico del templo, lo que permitirá continuar con otros estudios tratando de implementar una cultura de prevención de desastre ante eventos sísmicos en este tipo de estructuras.

Se recomienda tomar los resultados con reserva ya que existen incertidumbres debidas al tipo de materiales y su degradación, antigüedad, patologías, esfuerzos residuales, rehabilitaciones, entre otras. Así mismo, instrumentar el templo durante más tiempo, registrando vibración ambiental a diferentes horas del día para descartar el ruido que se pueda presentar al realizar las mediciones.

Otra recomendación importante es instrumentar las torres para determinar su periodo natural, ya que son elementos estructurales (macroelementos) que trabajan autónomamente durante un sismo. Además, se ha observado que son las que se dañan con mayor frecuencia. Al conocer su comportamiento sísmico se podrán realizar reforzamientos para evitar daños posteriores.

Por último, es importante realizar más pruebas no destructivas para monitorear el Patrimonio Edificado, así como implementar programas de mantenimiento continuo. Todo esto con el objetivo de conservar y preservar este legado histórico, sin olvidar la seguridad estructural y la integridad de las personas que hacen uso de esas estructuras.

Reconocimientos

Agradecemos la colaboración del Cuerpo Académico (CA-BUAP 344) denominado “Ciencias de la Tierra Aplicada a la Gestión de Desastres Naturales” de la Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por su invaluable apoyo en esta investigación.

Conflicto de intereses

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

Referencias

- Aillapan, R. y Boroschek, R. (2012). Vibración debido a oleaje en edificios ubicados en zonas costeras. Universidad de Chile.
- Casolo, S., Neumair, S., Parisi, M. y Petrini, V. (2000). Analysis of seismic damage patterns in Old Masonry Church Facades. *Earthquake Spectra*. 16(4), pp. 757-773. DOI: <https://doi.org/10.1193/1.1586138>
- Dogliani, F., Moretti, A. y Petrini, V. (1994). Le chiese e il terremoto. Dalla vulnerabilità constatata nel terremoto del Friuli al miglioramento antisismico nel restauro. Verso una politica di prevenzione. Italia: Lint Editoriale Associati. 320 P.
- Espinoza, F. (1999). Determinación de características dinámicas de estructuras [Tesis de Doctorado]. Universidad Politécnica de Cataluña. Cataluña, España.
- Esquivel, L. y Schmidt, V. (2016). Mediciones de vibraciones ambientales en tres edificios de concreto reforzado de 28, 11 y 6 pisos. *Ingeniería Sísmica*. (95), pp. 81-103. DOI: <https://doi.org/10.18867/ris.95.391>
- Fäcke, A., Parolai, S., Richwalski, S.M., y Stempniewski, L. ((2006)). Assessing the vibrational frequencies of the Cathedral of Cologne (Germany) by Means of Ambient Seismic Noise Analysis. *Natural Hazards*, 38, pp. 229-236. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-005-8616-2>
- Gerencia Centro Histórico y Patrimonio Cultural. (2016). Manual de procedimientos del patrimonio monumental de Puebla para efectos de sismo. Disponible en página Web de OiiPDF.COM.
- Hernández, H., Huergo, I. y Arce, C. (2021). Pruebas de vibración ambiental en un edificio durante su proceso de reforzamiento. *Ingeniería Sísmica*. (105), pp. 84-101. DOI: <https://doi.org/10.18867/ris.105.506>
- Hernández, H., Huergo, I. y Ceja, C. (2016). Consideraciones de diseño de servicio de puentes peatonales. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. Merida.
- Hernández, H., Rivera, D. y Arce, C. (2014). Vibración ambiental de puentes con pérdida de sección y/o con sección agrietada. En: A. S. Estructural, *Memorias XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional y el Bienestar Social*. Uruguay. 120 P.
- Lagomarsino, S. (1998). Seismic damage survey of the churches in Umbria, Genova, Italy.
- Máximo, P. y Lozano, J. (2009). Periodos naturales en las direcciones ortogonales del templo del Refugio. XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Puebla, México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.
- Meli-Piralla, R., Rivera-Vargas, D., Sánchez-Ramírez, R. y Miranda, E. (2001). Instrumentación sísmica de la Catedral Metropolitana. Resultados 1997-2000. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (65), pp. 17-48. DOI:

<https://doi.org/10.18867/RIS.65.188>

Meli, R. (2011). Los conventos mexicanos del siglo XVI: Construcción, ingeniería estructural y conservación (1^{ra} ed.). México: Miguel Ángel Porrúa. 341 P.

Meza, J. (2013). Metodología con base en macroelementos para la evaluación de resistencia y mecanismos de colapso de iglesias antiguas de mampostería [Tesis de Doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Morales, J. (2017). Identificación de parámetros en edificios mediante tiempos de propagación de ondas para detección de daño. [Tesis de Doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México. México: Repositorio Digital de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

Núñez-Gaona, A., Martínez-Ruiz, G., Jara-Guerrero, J.M., y Gaytan-Rodríguez, R. (2016). Comportamiento sísmico del templo de San Agustín en Morelia, Michoacán. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. XX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Mérida, Yucatán, México.

Ordaz, M., Castellanos, F. y Zapata, A. (2005). Manual de uso del programa Degtra A4. en Dokumen.

Ramos, C. (2015). Estudio del comportamiento estructural del ex-convento Franciscano de Tecamachalco. [Tesis de Maestría]. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla.

P. Máximo-Romero. Profesora Investigadora de la Facultad de Ingeniería, Ciencias Básicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Líneas de investigación en Ingeniería Estructural. Perfil PRODEP desde el año 2016. Miembro del Cuerpo Académico 344 Ciencias de la Tierra Aplicada a la Gestión de Desastres Naturales, miembro del Padrón de Investigadores de la VIEP desde 2017, asesora del programa Delfin. Publicaciones nacionales e internacionales y ponente en Congresos nacionales e internacionales. Miembro del proyecto "Concrete" en Italia. ORCID: 0000-0002-2698-842X

R. Ramos-Aguilar. Profesor Investigador de la Facultad de Ingeniería en el Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, líneas de investigación en Ciencias de la Tierra y Atmosféricas, miembro del Registro de Evaluadores Acreditados CONACYT-RCEA, Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI), International Association of Hydrological Sciences (IAHS), Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), Red Temática CONACYT Socio-Ecosistemas y Sustentabilidad, Red Iberoamericana de Energía, Agua y Eficiencia Energética. Perfil PRODEP desde el año 2009. Responsable del Cuerpo Académico 344 Ciencias de la Tierra Aplicada a la Gestión de Desastres Naturales, miembro del Padrón de Investigadores de la VIEP desde 2006, asesor del programa Delfin, Reconocimiento Internacional otorgado por Latin America Geospatial Excellence Awards por el proyecto: "Análisis Geoestadístico de los cañones Xaltelulco, Tepeloncocone, Tenepanco, Colorada y Quimichule del Volcán Popocatepetl, (México). Publicaciones nacionales e internacionales y ponente en Congresos nacionales e internacionales. Responsable de proyectos nacionales e internacionales. ORCID: 0000-0001-5660-6608

V. Galindo-López. Profesor Investigador de la Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Perfil PRODEP desde el año 2016. Miembro del Cuerpo Académico 344 Ciencias de la Tierra Aplicada a la Gestión de

Desastres Naturales. Publicaciones nacionales e internacionales. ORCID:0000-0003-0112-2432.

M. Ávila-Cruz. Profesor Investigador de la Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Perfil PRODEP desde 2022. Miembro del Cuerpo Académico 344 Ciencias de la Tierra Aplicada a la Gestión de Desastres Naturales. Cuenta con publicaciones nacionales e internacionales. ORCID: 0000-0002-8024-2119

G. Yáñez-Pérez. Profesora Investigadora, Facultad de Ingeniería, Ciencias Básicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Colaboradora del Cuerpo Académico 344 Ciencias de la Tierra Aplicada a la Gestión de Desastres Naturales. Publicaciones nacionales e internacionales. ORCID: 0000-0002-4529-5995

D.M. Romano-Cano. Estudiante de la Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Becada por el programa Delfin (2022) y por la VIEP en el programa "Haciendo Ciencia en la BUAP 2022". ORCID: 0000-0003-2426-3043