Encuentro México y Francia

Innovación y uso de la tecnología en la conservación del patrimonio cultural



Museo Nacional de Antropología
19 y 20 de febrero de 2025
Ciudad de México, México

Encuentro México y Francia

Innovación y uso de la tecnología en la conservación del patrimonio cultural



Crédito: INAH-Ángel Mora Flores

19 y 20 de febrero de 2025



Crédito: INAH-Ángel Mora Flores

Organizadores

Cultura
Secretaría de Cultura
INAH
Coordinación Nacional de Monumentos Históricos
MNA Museo Nacional de Antropología
Ministère de la Culture
Liberté
Égalité
Fraternité
Ambassade de France au Mexique
Liberté
Égalité
Fraternité
IFAL
CY Cergy Paris Université
CICM Colegio de Ingenieros Civiles de México A.C.
Asociación Alumni México Francia A.C.
CICEPAC
Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Puebla, A.C.

Patrocinadores

Cultura
Secretaría de Cultura
INAH
CICM Colegio de Ingenieros Civiles de México A.C.
Freyssinet
sixense
EE Euro Estudios
50 Aniversario 1976 - 2026
TGC
Galape Inmuebles S.A. de C.V.
EM Equipos Mejores
USR
NAH K'UH
SYSTOP®
Sistemas y Servicios para Topografía, S. A. de C. V.
scala®
Supervisión, Consultoría, Asesoría y Laboratorio, S.A. de C.V.
MIDAS

Portada / portadilla
Crédito: INAH-LIAD-CNMH-Marisela González Quiroz. Año de toma: 2025. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.
Crédito: David Bordes.

Encuentro México y Francia
Innovación y uso de la tecnología en la conservación del patrimonio cultural

Queda prohibida la reproducción parcial o total, directa o indirecta del contenido de la presente obra, por cualquier medio o procedimiento, sin contar previamente con la autorización de los editores en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y, en su caso, de los tratados internacionales aplicables. La persona que infrinja esta disposición se hará acreedora a las sanciones legales correspondientes.

Todos los derechos reservados. Se reafirma que sobre esta obra y cualquiera de sus contenidos pertenecientes al Instituto Nacional de Antropología e Historia se encuentran reservados todos los derechos de autor y conexos. Por lo que queda prohibido cualquier uso, reproducción, extracción, recopilación, procesamiento, transformación y/o explotación, sea total o parcial, ya en el pasado, en el presente o en el futuro, con fines de entrenamiento de cualquier clase de inteligencia artificial, minería de datos y textos, y en general, cualquier fin de desarrollo o comercialización de sistemas, herramientas o tecnologías de inteligencia artificial, incluyendo –pero no limitado– a la generación de obras derivadas o contenidos basados total o parcialmente en este libro y cualquiera de sus partes pertenecientes al Instituto Nacional de Antropología e Historia. Cualquier acto de los aquí descritos u otro similar está sujeto a la celebración de una licencia. Realizar cualquiera de estas conductas sin autorización puede resultar en el ejercicio de acciones jurídicas.

La reproducción, uso y aprovechamiento por cualquier medio de las imágenes pertenecientes al patrimonio cultural de la nación mexicana contenidas en esta obra está limitada conforme a la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicos, Artísticos e Históricos y a la Ley Federal del Derecho de Autor. Su reproducción debe ser autorizada previamente por el INAH y por el titular del derecho de autor.

Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Primera edición, 2026.

Las/os autoras/es son responsables del contenido de sus contribuciones como la exactitud de los datos, la atribución de citas y referencias bibliográficas, los derechos legales por la publicación del material aportado (en texto e imagen) y aprobado para cerrar la edición en ambos idiomas.

ISBN 978-968-9748-35-9

Comité Editorial

Mtro. Luis Rojas Nieto
Mtra. en Arq. Valeria Valero Pié
Pascal Liévaux
Antrop. José Luis Perea González
M. en I. Enrique García Fuentes
Mtra. Mariana López Mendoza
Mtro. Manuel Villarruel Vázquez
Dr. Juan Carlos García Salas
Dr. Moisés Juárez Camarena
Mtro. Mauricio Jessurun Solomou
Mtro. Juan Antonio Rodríguez Hernández
Dra. Beatriz Menéndez Villar
Ing. Salvador Fernández del Castillo Flores
Mtra. Teresa Menchelli Pérez
Ing. Roberto Aguerrebere Salido
Lic. Ángel Mora Flores
Lic. Ángel J. Barajas Martínez

Producción editorial: Bermellón Edición e Imagen, SA de CV

Carlos Frank Matamoros
Editor

María del Carmen Vidal Agúndez y María Guadalupe Rosales Calzada
Redacción y apoyo editorial

José Eduit Ramírez Vidal
Apoyo administrativo

Imágenes de Portada:
Santuario de Nuestra Señora de Los Ángeles: Fotografía de dron, modelo tridimensional con fotogrametría digital y escáner láser. Crédito: INAH-LIAD-CNMH-Marisela González Quiroz (MGQ)
Catedral de Notre Dame, París, Francia. Crédito: David Bordes (DB)

Fotógrafos y archivos:
Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) | Coordinación Nacional de Difusión | Dirección de Medios de Comunicación | Fotógrafos: Melitón Tapia, Luis Gerardo Peña Torres, Daniel Santaella y Cuauhtémoc Moreno (INAH-CND)
INAH | Fototeca Nacional del INAH SINAFO
Fototeca Nacional del INAH SINAFO, Fotografía (Carlos Arce León)
Subdirección de Arqueología Subacuática (SAS), Dirección de Estudios Históricos (DEH), Coordinación Nacional de Arqueología (CNA) y Kotaro Yamafune, Fotografía Mediateca-INAH
INAH | Fotógrafo: Ángel Mora Flores (INAH)
Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM) | Fotógrafo: Eduardo Sánchez Rodríguez, levantamiento de imagen en evento
EE | Euro Estudios | Fotógrafa: Laura Nayeli Guerrero Barajas / Euro Estudios (EE)
Archivo: Laboratorio de Geoinformática-Instituto de Ingeniería, UNAM (Gabriel Yves Armand Auvinet Guichard) Laboratorio de Análisis GeoEspacial (II-UNAM)
Proyecto Salvamento Arqueológico del Tren Maya, Área de conservación, Proyecto Salvamento Arqueológico del Tren Maya, Planos (Manuel Eduardo Pérez Rivas y Félix Albano Camacho Zamora)
Sackbé, SA de CV, Planos (Antonio Mondragón Lugo y Agustín Hernández Hernández)
Mageba, Fotografía (Carlos Arce León, Hugo Hernández Barrios y David Pineda Muñoz)
Grupo TARES, SA de CV, Fotografía (David Pineda Muñoz)
REMPART, Fotografía
Art Graphique et Patrimoine, Fotografía, Ilustración (José Alejandro Arredondo Guillén)
Pilotes de Control, SA. Fotografía, Ilustración (Francisco Ramos Kuri)
Proyecto Tzintzuntzan (PROYTZIN), Fotografía, Ilustración (José Luis Punzo Díaz, Alfonso Gastélum Strozzi y Edgar Santiago Ferreyra Alanís)
Laboratorio de Imagen y Análisis Dimensional (LIAD-CNMH), Fotografía, Ilustración (Ángel Mora Flores)
Damien Tamagnan, Fotografía
Luc Ellermann, Fotografía
Antonio Mondragón Lugo, Fotografía, Planos
Agustín Hernández Hernández, Fotografía, Planos
Diana Hernández, Planos
Hugo Hernández Barrios, Fotografía, Ilustración
David Pineda Muñoz, Fotografía, Ilustración
Livio de Luca, Ilustración
José Ortega Ramírez, Fotografía, Ilustración
José Luis Salas Corrales, Ilustración
Cristofer Chávez Fraga, Ilustración
José G. Huchim Herrera, Fotografía, Ilustración
Héctor Emmanuel Cauich Caamal, Fotografía, Ilustración
Choisy, Ilustración
Thomas Parent, Fotografía
Charles Shahrokh Ghavamian, Fotografía, Planos, Ilustración
Fabián Bernal Orozco Barrera, Fotografía
Fernando Peña Mondragón, Fotografía
Manuel Eduardo Pérez Rivas/Félix Albano Camacho Zamora Ilustración, Fotografía
Benjamín Romano, Fotografía, Ilustración
Manuel Dueñas García, Fotografía, Ilustración
José Luis Punzo Díaz, Fotografía, Ilustración
Edgar Santiago Ferreyra Alanís Fotografía, Ilustración
Alfonso Gastélum Strozzi, Fotografía
María Eugenia Cendejas, Fotografía
Ángel Mora Flores (LIAD-CNMH), Fotografía, Ilustración
Marisela González Quiroz (LIAD-CNMH), Ilustración

Contenido

Inauguración

Mtra. en Arq. Valeria Valero Pié
10

Dra. Blanca Elena Jiménez Cisneros
12

Dr. Víctor Rodríguez Padilla
14

Dr. Pascal Liévaux
17

Excma. Sra. Delphine Borione
19

Antrop. José Luis Perea González
23

Conferencias Magistrales
19 de febrero de 2025

Moderador: **Dr. Pascal Liévaux**
Secretario: **Mtro. Luis Rojas Nieto**
26, 36

La convergencia entre tecnología y tradición: El INAH y el futuro de la conservación del patrimonio cultural
Antrop. Diego Prieto Hernández
Antrop. José Luis Perea González
29

Conservación del patrimonio cultural de Francia: disposiciones generales nuevas y problemas actuales
Diplomada Isabelle Chave
37

Mesa 1
Gestión de riesgos, monitoreo e instrumentación del patrimonio cultural

Moderador: **M. en I. Enrique García Fuentes**
53

Experiencias en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios históricos
Dr. Hugo Oswaldo Ferrer Toledo
55

Preservación de edificios históricos mediante instrumentación y monitoreo periódico
Ing. Damien Tamagnan
63

Riesgos geotécnicos y patrimonio cultural en la Ciudad de México
Dr. Gabriel Yves Armand Auvinet Guichard
69

Mesa 2
Intervenciones de restauración: entre la tradición y la innovación

Moderadora: **Mtra. en Arq. Valeria Valero Pié**
Secretaria: **Mtra. Mariana López Mendoza**
77

Innovaciones y evolución de las técnicas de limpieza
Dr. Luc Ellermann
79

Tradición e innovación en los trabajos de intervención de la cúpula central del Santuario de Nuestra Señora de Los Ángeles en la Ciudad de México
Mtro. en Arq. Antonio Mondragón Lugo
Dr. Agustín Hernández Hernández
85

Capilla de María Candelaria o Santiago Apóstol, Nepopualco: Intervención técnico-constructiva tras el sismo de 2017
Arq. David Pineda Muñoz
93

Alternativas técnico-constructivas en la intervención de inmuebles históricos: experiencias en Morelos y Guerrero
Ing. Carlos Arce León
Ing. Hugo Hernández Barrios
Arq. David Pineda Muñoz
103

El aislamiento sísmico en estructuras de mampostería para la conservación del patrimonio
Ing. Stefano Barone
Expuesto por **Ing. Sergio Aguilar Sanders**
115

Mesa 3
Innovación y uso de tecnología en la conservación del patrimonio cultural

Moderador: **Mtro. Manuel Villarruel Vázquez**
123

Notre Dame de París: una catedral de datos digitales y conocimientos multidisciplinarios para las ciencias del patrimonio cultural
Dr. Livio de Luca
127

La tecnología al servicio del patrimonio: el diagnóstico a través de los métodos geofísicos
Dr. José Ortega Ramírez
139

Digitalizando el Puuc
Arqlgo. José G. Huchim Herrera
Arqlgo. Héctor Emmanuel Cauich
149

La fotogrametría digital en la arqueología subacuática: explorando el patrimonio sumergido de México con tecnología de vanguardia
Dr. Roberto E. Junco Sánchez
157

Mesa 4
Resiliencia y seguridad estructural del patrimonio cultural

Moderador: **Dr. Moisés Juárez Camarena**
Secretario: **Dr. Norberto Domínguez Ramírez**
165

Evaluación del comportamiento mecánico de bóvedas de la Catedral de Notre Dame de París.
Dr. Thomas Parent (Participación virtual)
167

Métodos innovadores en ingeniería estructural para la preservación del patrimonio
Dr. Charles Shahrokh Ghavamian
175

Análisis estructural a partir de nubes de puntos
Mtro. en Arq. Fabián Bernal Orozco Barrera
181

Estrategia integral de análisis estructural para la conservación del patrimonio histórico
Dr. Fernando Peña Mondragón
189

Conferencias Magistrales
20 de febrero de 2025

Moderador: **Mtro. Mauricio Jessurun Solomou**
199

Notre Dame, la ciencia en acción
Dr. Pascal Liévaux
203

Las herramientas tecnológicas en apoyo al salvamento arqueológico del Tren Maya
Dr. Manuel Eduardo Pérez Rivas
Rest. Félix Albano Camacho Zamora
209

Mesa 5
La cooperación México y Francia para la conservación del patrimonio cultural

Moderador: **Mtro. Juan Antonio Rodríguez Hernández**
220

REMPART, una red al servicio del patrimonio y de las personas
Lic. Marie-Georges Pagel Brousse
Mtra. Johanna O'Byrne
223

Los modelos digitales al servicio del patrimonio de la humanidad, el caso de Notre Dame de París
Arq. José Alejandro Arredondo Guillén
231

SCORE, un proyecto de colaboración entre Europa y México sobre el patrimonio arquitectural
Dra. Beatriz Menéndez Villar
241

Mesa 6
La gerencia de proyectos en la conservación del patrimonio cultural

Moderador: **Ing. Salvador Fernández del Castillo Flores**
251

La conservación del patrimonio en los grandes proyectos urbanos. Ejemplo en la Ciudad de México
Arq. Benjamín Romano
253

El Plan de Seguridad de las Catedrales en Francia a partir de 2020
Mtro. Jean-François Duarte-Paixao
261

Tecnologías recientes en la Gerencia de Proyectos de Conservación del Patrimonio
Ing. Oscar Solís Yépez
269

Actualización de tecnología de obras históricas
Ing. Francisco Ramos Kuri
277

Mesa 7
Innovación y uso de tecnología en la divulgación del patrimonio cultural

Moderadora: **Mtra. Teresa Menchelli Pérez**
289

Reconstrucción 3D y su impacto en la renovación museográfica: El caso de La Quemada, Zacatecas
Dr. Manuel Dueñas García
291

Diez años digitalizando la ciudad prehispánica de Tzintzuntzan, México. Investigación y conservación, una propuesta de divulgación
Dr. José Luis Punzo Díaz (Participación virtual)
Dr. Alfonso Gastélum Strozzi
Arq. Édgar Santiago Ferreyra Alanís
299

Documentación tridimensional del patrimonio cultural mexicano, presente y futuro
Lic. Ángel Mora Flores
309

Clausura

Mtra. en Arq. Valeria Valero Pié
321

Mtro. Juan Antonio Rodríguez Hernández
323

Mtro. Mauricio Jessurun Solomou
324

M. en I. Enrique García Fuentes
325

Mtro. Luis Rojas Nieto
326

Semblanzas

328

Agradecimientos

340

Inauguración

Para mayor detalle escanea el código QR y podrás ver la transmisión completa de esta sección del Encuentro México y Francia

Muy buenos días. Es un gran gusto para mí estar hoy aquí, en este extraordinario museo, para dar inicio al Encuentro México y Francia, Innovación y uso de tecnología en la conservación del patrimonio cultural.

Me llena de alegría ver este auditorio con tantas caras conocidas y, también, con otras tantas por conocer. Sabemos que hay un gran número de participantes a través de las plataformas y redes sociales, así que es un enorme placer compartir este espacio con todos ustedes.

Saludo con muchísimo afecto a los distinguidos miembros de este presídium, que nos honran con su presencia en este acto inaugural y, por supuesto, a todo el público asistente. La idea de este encuentro académico, como otras iniciativas similares, nació a partir de algunas charlas informales entre colegas y amigos con preocupaciones e intereses comunes. En años anteriores, se llevaron a cabo algunos congresos internacionales y nacionales organizados por varios colegios de ingenieros civiles, en torno al patrimonio cultural. Durante los siempre esperados recesos para tomar una taza de café, algunos de los aquí presentes empezamos a interesarnos por contar con más información sobre diversos casos y ciertas tecnologías que se han utilizado en la conservación del patrimonio cultural, tanto en México como en Francia.

A partir de esos primeros momentos y con la intención de llegar a un público más amplio en ambos países, se conformó de manera oficial e institucional el comité académico del encuentro, con la participación del Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM), del Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Puebla (CICEPAC), de la Asociación Alumni México Francia, la Universidad Cergy París, y el Instituto Nacional de Antropología e Historia, a través de la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos, con la estrecha colaboración de la embajada de Francia en México y el Ministerio de Cultura de Francia, con quienes estamos muy agradecidos.

De esta manera, el Encuentro México y Francia ha sido organizado con el objetivo de reunir especialistas franceses y mexicanos, para el intercambio académico de investigaciones y experiencias relacionadas con el uso de diversas tecnologías en el estudio, la conservación, la restauración y la difusión del patrimonio cultural de ambos países.

La conservación y divulgación de nuestro vasto legado cultural es, sin duda, un desafío complejo. Pero podemos afirmar que la innovación y las tecnologías de la siguiente generación, han abierto un universo de nuevas posibilidades en nuestro quehacer. El encuentro busca presentar algunas experiencias en el estudio y la atención que se ha brindado al patrimonio cultural, con el apoyo de diversas tecnologías, equipos e instrumentos, así como dar cuenta de algunos resultados en materia de cooperación técnica y científica entre México y Francia.



Crédito: INAH-CNDI-Melitón Tapia
Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LSNMAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Lo anterior, como ustedes lo han podido ver en el programa, a través de cuatro conferencias magistrales y siete mesas redondas, con los siguientes temas: gestión de riesgos, monitoreo e instrumentación del patrimonio cultural; intervenciones de restauración entre la tradición y la innovación; innovación y uso de la tecnología en la conservación del patrimonio cultural; resiliencia y seguridad estructural del patrimonio cultural; la cooperación México-Francia para la conservación del patrimonio cultural; la gerencia de proyectos en la conservación del patrimonio cultural y la innovación y uso de la tecnología en la divulgación del patrimonio cultural.

No me resta más que, a nombre de las instituciones organizadoras de este encuentro y de los miembros del comité académico, desearles unas jornadas muy fructíferas y enriquecedoras, y reiterar nuestro mayor agradecimiento a todas las personas e instituciones involucradas, ponentes, moderadores, secretarios de mesa, entre muchos otros, y, por supuesto, agradecer a todo el público que ha manifestado interés en estos temas.

Muchas gracias y buenos días.

Mtra. en Arq. Valeria Valero Pié
Coordinadora Nacional de Monumentos Históricos del INAH



Crédito: INAH-CNID-Melitón Tapia
Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LSNCAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Muchas gracias a todos los que tuvieron la idea de organizar este encuentro y, sobre todo, ponernos a trabajar a todos en conjunto en este tema, por la riqueza del programa que presentó la maestra en arquitectura Valero Pié.

México y Francia tienen una larga tradición de cooperación en el ámbito cultural, como sabe muy bien la embajadora Delphine Borione, que se encuentra con ustedes, con quien compartimos la visión de preservar y difundir la cultura como base de la cohesión social.

Esto lo hacemos, y en particular desde la perspectiva de nuestro país, buscando la difusión de la memoria colectiva y contribuir a la identidad nacional. En este contexto, los retos que la conservación de los bienes culturales plantea son considerables.

Los desafíos derivados de la degradación por catástrofes naturales, la destrucción de monumentos prehispánicos en la época colonial, así como el pillaje del que fueron objeto en años posteriores, y los recursos limitados, entre otros, han puesto en riesgo tanto los bienes materiales como los inmateriales, incluyendo la memoria histórica y cultural de las sociedades que los produjeron.

Este desafío exige soluciones innovadoras para garantizar la preservación. Y qué mejor que contar, como en este caso, con la participación de los ingenieros, en particular de los ingenieros de México, que han tenido una amplia historia para recuperar edificios y joyas arqueológicas que tenemos en el país, y que han sabido desarrollar una tecnología que desempeña un papel crucial en la conservación del patrimonio, la cual se ha convertido en una herramienta indispensable para documentar, restaurar, proteger, difundir y administrar los bienes culturales, materiales e inmateriales.

La ciencia y la tecnología también han formado parte integral del patrimonio de la humanidad, al ser componentes del desarrollo humano; en tal sentido, constituyen los medios idóneos para coadyuvar en la preservación del patrimonio cultural.

Por ello, la colaboración multidisciplinaria destaca en este evento, en donde estamos conjuntando no solo ciencias tecnológicas con las ciencias sociales y humanas, sino también las experiencias de dos países. México y Francia cuentan con profesionales especializados en la restauración y conservación del patrimonio arquitectónico y urbanístico, que se capacitan constantemente en las diversas áreas. Y qué mejor momento que en este evento, para establecer nuevas líneas de desarrollo y participación conjunta.

México y Francia tienen que seguir estrechando lazos a través de acciones conjuntas, alineadas con las prioridades que compartimos, para garantizar el óptimo mantenimiento del patrimonio. Por ello, debemos seguir implementando trabajos conjuntos, encaminados a promover la labor de quienes se dedican a la conservación y restauración del patrimonio cultural, ya que gracias a los conocimientos históricos, técnicos y científicos, los especialistas logran preservar, en las mejores condiciones posibles, la historia de la humanidad.

Hago votos porque de aquí salgan innumerables proyectos en conjunto y muchas posibilidades de continuar con la colaboración.

Muchas gracias.

Dra. Blanca Elena Jiménez Cisneros
Embajadora de México en Francia



Crédito: INAH-CND-Melitón Tapia
Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LSMAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Encuentro México y Francia: Innovación y uso de la tecnología en la conservación del patrimonio cultural

Señoras y señores,
Distinguidos representantes de los gobiernos de México y Francia.
Estimados colegas, invitados especiales, amigos todos:

Me honra participar en este significativo encuentro, que celebra los profundos lazos históricos, culturales, científicos y tecnológicos entre México y Francia. Agradezco la invitación a este foro que pone en el centro de la reflexión un tema de gran trascendencia para ambas naciones: la innovación tecnológica al servicio de la conservación de nuestro patrimonio cultural. Saludo con respeto a la embajadora de Francia en México, señora Delphine Borione, y muy particularmente a nuestra embajadora en Francia, la doctora Blanca Jiménez, a quien tuve el privilegio de tener como profesora en la Facultad de Ingeniería de la universidad. Su enseñanza, implacable y generosa, fue una guía temprana que contribuyó a forjar en mí el carácter y la vocación que hoy me permiten servir a México desde esta alta responsabilidad.

Hace algunos años, emprendí un camino de formación académica que me condujo a Francia, donde realicé mis estudios de maestría, doctorado y posdoctorado en materias vinculadas al sector energético, en particular en el ámbito del petróleo. Durante dieciséis años, Francia no fue sólo un país de acogida, sino una nación que me ofreció

una formación científica rigurosa y una cultura profundamente comprometida con la preservación de su memoria histórica. Francia ocupa un lugar entrañable en mi vida personal y profesional. Permanece en mi corazón como tierra de conocimiento, disciplina intelectual y afectos perdurables. Fue allí donde adquirí herramientas técnicas de alto nivel, así como una visión integral del desarrollo que hoy me permite servir a México con mayor responsabilidad y gratitud.

Hoy, en el ejercicio de mi responsabilidad como Director general de Petróleos Mexicanos, puedo afirmar que esa formación me proveyó no solo de conocimiento técnico, sino también de una comprensión más amplia del papel estratégico que desempeña la energía en el desarrollo de las naciones. Esta visión incluye, de manera ineludible, la necesidad de conciliar el progreso industrial con la preservación del entorno, la historia y la riqueza cultural de los pueblos.

México, al igual que Francia, es una nación profundamente orgullosa de su herencia. Nuestro patrimonio cultural no es únicamente testimonio del pasado, sino fundamento de nuestra soberanía, raíz viva de nuestras comunidades y guía para la construcción del porvenir. Desde esta convicción, la tecnología adquiere su verdadera dimensión: ser una herramienta al servicio de la nación, orientada al bien común y sustentada en los valores que nos definen como sociedad.

En Petróleos Mexicanos sostenemos con firmeza que el desarrollo científico y tecnológico debe avanzar en armonía son el respeto al entorno histórico, social y ambiental de nuestra nación. Nos encontramos en un proceso de transformación profunda, encaminado a consolidar una empresa energética eficiente, moderna y, sobre todo, socialmente responsable. Esta responsabilidad no se limita a cumplir estándares técnicos, sino que implica un compromiso activo con el bienestar de las comunidades, la preservación del patrimonio y el futuro sostenible del país.

En este contexto, el diálogo entre México y Francia adquiere un valor estratégico. Ambas naciones han demostrado que el progreso puede ir de la mano con la preservación de lo esencial; que la técnica puede convivir con la estética; que la industria puede respetar la memoria, y que la soberanía tecnológica no implica renunciar al alma nacional.

Por ello, este encuentro es más que un evento académico: es un acto de diplomacia cultural, de visión compartida y de compromiso con el porvenir. La experiencia francesa en conservación y aplicación tecnológica al patrimonio es ejemplar; la riqueza cultural de México es inconmensurable. La convergencia de estos dos legados puede dar origen a soluciones innovadoras ante los grandes desafíos de nuestro tiempo.

En nombre de Petróleos Mexicanos, reitero nuestro respeto por las expresiones culturales de nuestra nación y nuestro compromiso con una industria energética responsable, sostenible y profundamente enraizada en la identidad mexicana. Nos sumamos a este diálogo con humildad, pero también con la firme convicción de que el desarrollo tecnológico de México puede —y debe— estar al servicio de su historia, su arte, su tierra y su gente.

Muchas gracias.

Dr. Víctor Rodríguez Padilla
Director General de Petróleos Mexicanos



Crédito: INAH-CNID-Melitón Tapia
Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LSMOAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Estoy muy feliz de estar aquí representando al Ministerio de Cultura de Francia y me gustaría agradecer, en primer lugar, a quienes me invitaron a participar a través de Beatriz Menéndez, mi colega en la Universidad de Cergy, lo que crea un vínculo extraordinario entre México y Francia con toda la investigación que realiza entre ambos países. Gracias. También agradezco a Luis Rojas, el organizador que está detrás de todo lo que vemos hoy, y a la Embajada de Francia por su apoyo, en especial a Emmanuel Eveno.

En el Ministerio de Cultura de Francia me encargo de apoyar todo lo referente a la investigación del patrimonio cultural, razón por la cual estoy hoy aquí. Y después de los intercambios que tuve con Luis, pude medir hasta qué punto compartimos problemáticas en temas de conservación y restauración del patrimonio cultural.

Por ello, tenemos todas las razones sobre la mesa para fortalecer el trabajo conjunto y la colaboración. Los desafíos que tenemos frente a nosotros son de varios órdenes: un desafío social: cuál es el impacto del patrimonio cultural en nuestra sociedad el día de hoy; un desafío ambiental, porque estamos hablando de los efectos del cambio climático y de los riesgos que conlleva, ya sean materiales o de bienes, tangibles o intangibles; desafíos no científicos y técnicos, que se preocupan más por la materialidad del patrimonio que por el patrimonio mismo, afectado por el cambio climático, pero que a su vez nos permiten mejorar nuestras acciones en temas de restauración de patrimonio cultural; y los desafíos no digitales, estamos hablando de todos los resultados de nuestras investigaciones y de este patrimonio digital, para poderlos compartir con los científicos a nivel internacional. Así que es un desafío digital.

Personalmente, estoy muy involucrado en varios proyectos en Europa y deseo fervientemente que México pueda colaborar a esa escala, con los investigadores que llevan a cabo trabajos importantes sobre el cambio climático y sus efectos sobre el patrimonio cultural, en los próximos años. Eso, para mí, es un tema global que tenemos que hablar no solo a nivel nacional, sino también para trabajar todos en conjunto. Y espero que así sea en un futuro muy cercano.

Gracias.

Dr. Pascal Liévaux
Jefe de la Delegación de Inspección, Investigación e Innovación de la Dirección General de Patrimonio del Ministerio de Cultura de Francia



Crédito: INAH-CNID-Melitón Tapia
Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Estimados miembros del presídium, estimados amigos, estimadas amigas de México y de Francia, o francomexicanos, querida embajadora de México en Francia, Blanca Jiménez. Es un gran placer estar hoy con ustedes en este gran Museo Nacional de Antropología, gracias querido Antonio Saborit, para este encuentro entre especialistas de México y Francia sobre los desafíos de la conservación del patrimonio cultural. Es un gusto también para mí, que trabajé muchos años junto con la asociación francesa Patrimonio sin Fronteras.

La UNESCO definió en 1972 el patrimonio como el legado del pasado que hoy disfrutamos y transmitimos a las generaciones futuras. Qué responsabilidad para todos nosotros, este legado contribuye a construir una nación, es un poco como un gran libro de historia que continúa hablando sobre tiempos pasados a través de los siglos.

La pregunta que se plantea en el temario de este evento se refiere al uso de las nuevas tecnologías para la conservación del patrimonio cultural y cómo afrontar esos desafíos.

Ahora bien, la reconstrucción de la Catedral de Notre Dame, en París, es un excelente ejemplo del uso de estas nuevas tecnologías. Agradezco que hayan elegido su restauración como un caso emblemático.

Como dijo en ese entonces nuestro presidente Emmanuel Macron: "Este monumento es una parte de nosotros, de todos nosotros. Esta Catedral de Notre Dame la reconstruiremos todos juntos, es una parte de nuestro destino".

Tanto la reconstrucción como la restauración representaron un reto considerable, movilizaron a unas dos mil personas de todos los oficios, que trabajaron día y noche durante un periodo de cinco años.

Hubo también una inmensa solidaridad internacional que agradecemos mucho. Se lograron innumerables proezas técnicas, se dieron numerosas innovaciones y mucho más.

El arquitecto mexicano Alejandro Arredondo, especialista en el modelado de información de construcción, lideró al equipo que desarrolló la maqueta tridimensional para reconstruir muros, techos y otros rincones del edificio. Hoy le quiero expresar nuestro agradecimiento por ello.

Fue un terreno de elección, un verdadero lugar de experimentación, ya que las preguntas planteadas eran complejas y requirieron la aplicación de soluciones muy innovadoras.

No deseamos, evidentemente, que se repita una catástrofe semejante. Pero podemos reconocer que cuando llega a ocurrir, a pesar de todas las precauciones, nos enseña mucho acerca del modo de construir, sobre las nuevas tecnologías que debemos emplear y de las medidas de seguridad que deben reforzarse. Sin duda, fue debido a este aprendizaje obligado que adquirieron las instituciones y los especialistas, que los organizadores de este encuentro invitaron a numerosos actores franceses. Gracias a ellos por venir aquí.

Francia y México tenemos mucho qué compartir, como también lo dijo la embajadora Blanca Jiménez.

En términos de restauración del patrimonio, en un país como México que vive a la sombra de los volcanes y bajo la amenaza constante de los terremotos, hay evidentemente un inmenso saber-hacer que se ha podido desarrollar.

Los desafíos que tenemos ante nosotros en materia de restauración del patrimonio cultural, también son considerables. Entre ellos está todo lo relacionado con el calentamiento global, que si se confirman las proyecciones, podemos esperar, lamentablemente, una acumulación y aceleración de desastres que causarán daños cada vez más graves al patrimonio urbano construido. Por ello, es urgente reforzar la resiliencia del patrimonio urbano.

No será suficiente aprender de los accidentes que se producen, también es necesario reforzar la prevención y pensar conjuntamente en una restauración preventiva.

En otras palabras, se trata de fortalecer la protección de nuestro patrimonio en previsión de estos acontecimientos considerados extremos. Y que no está, o al menos no con la misma frecuencia ni intensidad que cuando fue construido, el patrimonio del que hoy somos responsables.

Estos desafíos son especialmente importantes en nuestros dos países, ya que ambos poseen un patrimonio antiguo y contemporáneo extremadamente rico y diverso.

Compartimos la convicción de que debemos protegerlo para legarlo en las mejores condiciones posibles a las futuras generaciones.

Muchísimas gracias por su atención y por este encuentro que será muy fructífero por esta colaboración.

Excma. Sra. Delphine Borione
Embajadora de Francia en México



Crédito: INAH-Ángel Mora Flores
Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFDAAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.



Crédito: INAH-CND-Melitón Tapia
Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LSMIAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Bienvenidos a este espacio, a este encuentro entre México y Francia. Muchas gracias por su presencia señora Delphine Borione, embajadora de Francia en México; saludos, desde luego, a la doctora Blanca Jiménez, embajadora de México en Francia, estimado presídium que nos acompaña y que encabeza esta reunión, este encuentro.

Expreso con mucha estimación el saludo del director general del Instituto Nacional de Antropología e Historia, Diego Prieto, quien esta mañana no nos pudo acompañar por razones de traslado que tuvo a otro estado, pero les manda un caluroso saludo a todas y a todos ustedes en este Museo Nacional de Antropología, que es una síntesis de la memoria de México, tanto del pasado prehispánico como de las culturas contemporáneas indígenas. Agradecemos al doctor Antonio Saborit, como anfitrión, que nos permite tener este diálogo para la realización de este encuentro.

Es una ocasión, también, para invitarlos a todos ustedes a conocer el segundo piso de este museo, que hace pocas semanas inauguró sus salas de etnografía que dan cuenta de la gran diversidad cultural de los pueblos indígenas de México, en más de cuatro mil metros cuadrados. Los invitamos porque reafirma la condición que tiene este gran museo, que ha cumplido ya más de 60 años dando un servicio a todo el pueblo de México, de lo que representa su patrimonio cultural. Por ello, es un honor darles la bienvenida a este significativo Encuentro México y Francia, Innovación y uso de tecnología en la conservación del patrimonio cultural.

Hoy, académicos, profesionales y especialistas de ambos países, se reúnen en este espacio para compartir conocimientos y experiencias, con el propósito de avanzar en la conservación y preservación de nuestro patrimonio cultural. Este evento no solo representa una oportunidad para fortalecer los lazos académicos entre México y Francia, sino también para consolidar el compromiso mutuo en el cuidado de nuestra memoria histórica y humana, como lo ha expresado la embajadora Delphine Borione.

En los últimos años, las relaciones culturales entre Francia y México han experimentado un enriquecedor intercambio que ha favorecido los lazos entre ambos países, destacando la historia compartida y el arte como campos fundamentales de este vínculo. A lo largo del siglo XX y principios del XXI, las conexiones culturales se han enriquecido, sobre todo a través de la diplomacia cultural, la cooperación académica y los proyectos conjuntos en restauración y conservación del patrimonio; además, la colaboración en festivales de cine, literatura y música, ha permitido que las expresiones culturales de ambos

países sigan recreándose mutuamente. Esta cooperación continúa siendo un puente sólido que refuerza el respeto y la admiración entre las dos naciones, fortaleciendo sus lazos culturales y creativos.

La conservación de nuestro patrimonio cultural es, sin duda, una de las mejores alternativas para resguardar nuestra historia y legado. A través de ella podemos revalorar el patrimonio como un testimonio de largo camino de encuentros culturales, sociales y políticos.

El patrimonio cultural no solo comprende los objetos y monumentos, sino también refleja la identidad y evolución como sociedad a lo largo del tiempo, lo que representa nuestro patrimonio cultural inmaterial.

Hoy más que nunca, resulta imperativo proteger y preservar estos testimonios materiales de nuestra historia. Cada monumento, cada sitio arqueológico, cada manifestación cultural, constituyen un vínculo con nuestras raíces y un recordatorio de los momentos que nos han formado como nación.

El valor de este patrimonio no reside únicamente en lo tangible, sino en su capacidad de conectar a las generaciones presentes con las del pasado, estableciendo un futuro venidero.

Este encuentro académico ha sido posible gracias al esfuerzo conjunto del Instituto Nacional de Antropología e Historia a través de la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos, como lo ha expresado la maestra en arquitectura Valeria Valero, su actual coordinadora, en colaboración con la embajada de Francia en México, el Colegio de Ingenieros Civiles de México, el Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Puebla (CICEPAC), la Asociación Alumni México Francia y la Universidad Cergy París. Este evento es un esfuerzo para reunir a los mejores especialistas franceses y mexicanos en un espacio de intercambio académico, en el que se compartirán experiencias sobre el uso de tecnologías innovadoras para el estudio, la conservación, la restauración y la difusión del patrimonio cultural de ambos países.

Este tipo de encuentros permite ampliar las fronteras del conocimiento, multiplicando las ideas y construyendo puentes de colaboración, que enriquecen nuestras prácticas en la preservación del patrimonio.

Asimismo, representa un claro ejemplo de cómo la cooperación internacional puede ser un motor para desarrollar soluciones más efectivas y sostenibles en la conservación de bienes culturales, ante lo que representa el cambio climático.

Es en este contexto donde las tecnologías más avanzadas juegan un papel decisivo, la innovación tecnológica ha abierto un universo de nuevas posibilidades para investigar, restaurar y difundir los bienes culturales, permitiendo que las intervenciones sean más precisas, menos invasivas y, al mismo tiempo, efectivas y resilientes. Herramientas como los escáneres láser, la fotogrametría digital, los drones y las tecnologías avanzadas, permiten no solo una conservación más detallada, sino también la creación de modelos digitales que facilitan su estudio y difusión a nivel global.

Este encuentro abordará una serie de temas clave relacionados con la innovación y el uso de tecnología en la conservación del patrimonio. Algunos de los aspectos que exploraremos incluyen la gestión de riesgos, monitoreo, intervenciones de restauración, innovaciones tecnológicas en la conservación, nuevas herramientas y enfoques para garantizar la preservación, la resiliencia, la seguridad estructural del patrimonio, la gerencia de proyectos de conservación y el uso de la tecnología en la divulgación de este patrimonio.

Estos tópicos reflejan la diversidad y profundidad del enfoque hacia la conservación, donde el uso de la tecnología no solo facilita las intervenciones, sino que también abre nuevos caminos para su difusión y comprensión.

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todos los organizadores, ponentes y participantes, por su dedicación y compromiso con la conservación de patrimonio cultural.

Este evento es un claro ejemplo de la importancia de seguir colaborando y compartiendo conocimientos entre México y Francia, para enfrentar juntos los retos de la preservación de nuestra herencia.

Los invito a aprovechar al máximo este espacio para el intercambio de ideas, aprender de la experiencia de otros y, sobre todo, fortalecer el vínculo entre nuestras naciones, en la misión de proteger y valorar lo que nos pertenece.

Con estas palabras declaro oficialmente inaugurado el Encuentro México y Francia.

Enhorabuena.

Muchas gracias.

Antrop. José Luis Perea González
Secretario Técnico del Instituto Nacional de Antropología e Historia

Conferencias Magistrales

19 de febrero de 2025







Moderador: **Dr. Pascal Liévaux**
Jefe de la Delegación de Inspección, Investigación e Innovación, y jefe del Departamento de Investigación, Valoración y Patrimonio Cultural Inmaterial del Ministerio de Cultura de Francia (MJS)

Secretario: **Mtro. Luis Rojas Nieto**
Vicepresidente de la Asociación Alumni México Francia

Para mayor detalle escanea el código QR y podrás ver la transmisión completa de esta sección del Encuentro México y Francia

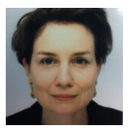
Crédito: CICM-Imagen en evento. Esta página







La convergencia entre tecnología y tradición: El INAH y el futuro de la conservación del patrimonio cultural
Antrop. Diego Prieto Hernández
Director General del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH)
Antrop. José Luis Perea González
Secretario Técnico del INAH



Conservación del patrimonio cultural de Francia: disposiciones generales nuevas y problemas actuales
Diplomada Isabelle Chave
Subdirectora de Monumentos Históricos y Sitios Patrimoniales del Ministerio de Cultura de Francia

Nota: Imágenes con enlace Web fueron transmitidas por INAH TV durante el evento realizado en el Auditorio Jaime Torres Bodet (Museo Nacional de Antropología).

Crédito: CICM-Imagen en evento. Esta página
Excepto retratos oficiales de ponentes.



Crédito: INAH-CND-Melitón Tapia
Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Conferencia Magistral
La convergencia entre tecnología y tradición: El INAH y el futuro de la conservación del patrimonio cultural

Antrop. Diego Prieto Hernández
Antrop. José Luis Perea González

1. Introducción

En este encuentro entre México y Francia sobre el patrimonio cultural, destaca un tema central: cómo la innovación y la tecnología están transformando la conservación del patrimonio cultural. En este contexto, el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) se erige como un referente clave en la integración de herramientas digitales y tecnológicas para preservar y difundir el legado cultural mexicano. El INAH ha intentado adaptarse a los retos contemporáneos, incorporando tecnologías de vanguardia que van más allá de la protección tradicional de monumentos y piezas históricas. Esta transición hacia la conservación digital no solo representa un avance técnico, sino también una renovación de enfoques y estrategias que garantizan la preservación a largo plazo, de los bienes culturales.

El uso de tecnologías avanzadas permite al INAH realizar intervenciones precisas y menos invasivas, favoreciendo una preservación más eficaz y sostenible. Las técnicas de escaneo 3D, la modelización digital y la fotografía de alta resolución, se han integrado al trabajo del INAH no solo para restaurar y conservar objetos y monumentos, sino también para crear réplicas digitales que permiten la divulgación del patrimonio a un público global. Esta capacidad de compartir digitalmente el patrimonio cultural abre nuevas posibilidades para la investigación, la educación y la accesibilidad, haciendo que los bienes mexicanos estén disponibles para personas de todo el mundo, independientemente de su ubicación.



Imagen 1. *Stand* del INAH en la Feria Internacional del Libro del Zócalo. Crédito: INAH-CND-Luis Gerardo Peña Torres.
Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Esta convergencia entre tecnología y tradición se convierte en una pieza fundamental para el INAH, pues ofrece una solución viable ante los retos de conservación del patrimonio, así como del paso del tiempo, el deterioro natural y las amenazas de la modernidad. Al integrar herramientas tecnológicas, el INAH garantiza la protección física de las piezas y asegura su preservación en formatos digitales, lo que facilita su acceso para futuras generaciones. Además, las tecnologías ofrecen nuevas perspectivas para el estudio y la investigación, lo que contribuye a un entendimiento más profundo de las culturas mexicanas y su legado.

La preservación digital, sin embargo, no elimina la importancia de las técnicas tradicionales de conservación, sino que las complementa, creando un modelo híbrido que fortalece los esfuerzos del INAH. A través de esta combinación, el Instituto logra mantener un equilibrio entre los métodos ancestrales que han protegido a México durante siglos y las innovaciones tecnológicas que representan el futuro. Este enfoque innovador, además de garantizar la protección efectiva del patrimonio mexicano, posiciona al INAH en la necesidad de explorar nuevas fronteras en la conservación, la difusión y el acceso a la riqueza cultural del país.

Por lo tanto, la integración de la tecnología en la conservación del patrimonio cultural no es solo un avance técnico, sino también una necesidad para el INAH. Es una respuesta ante los desafíos contemporáneos que enfrentan las naciones con un legado cultural tan vasto y diverso, como el mexicano. La fusión de lo tradicional y lo digital ofrece una oportunidad única para preservar el patrimonio de manera más accesible, eficiente y duradera, asegurando que las futuras generaciones puedan continuar valorando y aprendiendo de esta rica herencia cultural.



Imagen 2. Trabajos de consolidación en la zona arqueológica de Moral Reforma, Tabasco. Crédito: INAH-CND-Luis Gerardo Peña Torres. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

En el marco de la conmemoración de su 86 aniversario, el INAH ha consolidado su papel como la institución más emblemática en la conservación y difusión del patrimonio cultural de México. A lo largo de sus más de ocho décadas de existencia, ha jugado un papel clave en la preservación de las huellas que las civilizaciones que habitaron el país han dejado a través del tiempo, desde los vestigios arqueológicos e históricos, hasta las tradiciones y expresiones del patrimonio vivo. Sin embargo, la conservación del patrimo-

nio cultural mexicano enfrenta actualmente nuevos retos, derivados de un mundo cada vez más conectado y tecnológicamente avanzado.

El cambio climático, el riesgo de destrucción por causas naturales y la expansión urbana son algunos de los factores que han puesto en peligro la supervivencia de estos bienes, aunado a una estrategia que mantuvo el modelo neoliberal y la globalización, frente a la apuesta por la recuperación de los valores de la conservación del patrimonio, haciendo a un lado el pragmatismo y las necesidades del mercado.

Las tecnologías emergentes se han consolidado como herramientas fundamentales para hacer frente a estos desafíos, permitiendo la conservación física de los objetos, así como la documentación, restauración y difusión de los bienes culturales, de manera más efectiva y accesible. Por lo cual, en esta ocasión expondremos algunas reflexiones que muestran la actuación del INAH en la integración de tecnologías en procesos de preservación, considerando tanto sus beneficios como los desafíos que esta integración implica para el futuro de la conservación del patrimonio cultural mexicano.



Imagen 3. Trabajos de restauración en Ek Balam. Crédito: INAH-CND-Daniel Santaella. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

2. El INAH y su papel en la conservación del patrimonio cultural mexicano

Desde su creación en 1939, el INAH ha desempeñado un papel crucial en la protección de los bienes culturales de México, realizando investigaciones, documentaciones y labores de conservación que abarcan tanto elementos materiales como inmateriales. Su misión ha sido siempre, asegurar que las generaciones futuras puedan acceder y comprender la historia cultural del país a través de la preservación de monumentos, sitios arqueológicos, obras de arte y las lenguas y tradiciones indígenas, que constituyen una parte esencial de la identidad nacional.

La preservación del patrimonio cultural no solo se refiere a la protección física de objetos y lugares, sino también a la transmisión del conocimiento relacionado con estos bienes, para las generaciones futuras. En este sentido, la integración de las nuevas tecnologías permite conservar, educar y difundir la riqueza cultural de México de manera más efectiva, con un alcance global.

3. La integración de nuevas tecnologías en la conservación del patrimonio cultural

La incorporación de la tecnología en la conservación del patrimonio cultural ha transformado las prácticas tradicionales en diversas disciplinas. El INAH ha adoptado herramientas avanzadas que permiten mejorar la precisión y la eficiencia en la conservación, restauración y difusión de los bienes culturales, optimizando su preservación y accesibilidad.



Imagen 4. Santuario de Nuestra Señora de los Ángeles. Crédito: INAH-CND-Daniel Santaella. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Arqueología y nuevas herramientas tecnológicas: En el campo de la arqueología, el uso de escaneo 3D y fotogrametría ha sido un avance fundamental. Estas tecnologías permiten crear modelos tridimensionales de sitios arqueológicos y artefactos sin necesidad de realizar intervenciones físicas, lo que minimiza el riesgo de deterioro. El escaneo 3D ofrece la posibilidad de hacer réplicas exactas de las piezas, lo que es particularmente útil para la creación de exhibiciones en museos, sin que se comprometa la seguridad de los objetos originales. De igual forma, el uso de drones ha facilitado la exploración de áreas remotas y de difícil acceso, logrando descubrir nuevos sitios arqueológicos que, anteriormente, no podían ser detectados.

Antropología y la conservación del patrimonio intangible: La antropología, que se enfoca en el estudio de las culturas contemporáneas, también ha experimentado una transformación con el uso de nuevas tecnologías. La grabación digital de las lenguas indígenas y las tradiciones orales, es decisiva para la conservación de los elementos intangibles del patrimonio cultural. A través de plataformas digitales, los registros de estas lenguas y tradiciones se almacenan y se difunden de manera que no solo se preservan, sino que también se pueden enseñar a las futuras generaciones, tanto a nivel nacional como internacional.
El uso de sistemas de archivo y bases de datos digitales ha facilitado la preservación de estos elementos intangibles, que muchas veces están en peligro de desaparecer debido a la globalización y al desplazamiento de las lenguas indígenas.

Historia del arte: Análisis digital y restauración remota: En la disciplina de la historia del arte, el uso de la fotografía de alta resolución y la espectroscopía ha permitido realizar análisis detallados de los materiales de las obras sin necesidad de tocarlas, lo que previene el desgaste de los bienes culturales. La restauración digital ha logrado reconstruir elementos perdidos de pinturas y esculturas sin necesidad de restaurarlas físicamente, lo que preserva su integridad y ofrece una visión más completa de la obra original.
Restauración y conservación preventiva: Una de las áreas donde las tecnologías han tenido un impacto más significativo es en la restauración. El uso del modelado 3D y de tecnologías de restauración digital ha conseguido reconstruir piezas artísticas dañadas, como murales o esculturas, que no pueden ser restauradas físicamente debido a su fragilidad. La tecnología no solo ofrece la posibilidad de recuperar las formas originales, sino también de crear réplicas exactas que se pueden estudiar sin correr el riesgo de dañar los objetos originales.

Además, el monitoreo ambiental mediante sensores de temperatura y humedad ha revolucionado la preservación de los bienes culturales. Estos sensores permiten mantener las condiciones óptimas para la conservación de objetos en museos y sitios arqueológicos, evitando el deterioro debido a cambios bruscos en el entorno.

En cuanto al patrimonio edificado, y con el objetivo de cumplir cabalmente con los fines institucionales, el INAH, a través de la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos (CNMH), creó en 2009 el Laboratorio de Imagen y Análisis Dimensional (LIAD). Este laboratorio implementó la tecnología de escáner láser para fortalecer el conocimiento científico y tecnológico en el ámbito de los bienes culturales y, en concordancia con este propósito, establecer una base de datos con modelos digitales de los monumentos históricos y arqueológicos más representativos del país. Desde entonces, el número de monumentos históricos y arqueológicos documentados en detalle ha aumentado a nivel nacional, superando el centenar y medio, logrando preservar una base de datos de modelos tridimensionales del patrimonio material de México. A lo largo de los años se han incorporado nuevas tecnologías y equipos, como un escáner portátil de luz blanca y un dron; en general, se ha promovido el uso de la fotogrametría digital de alta resolución.

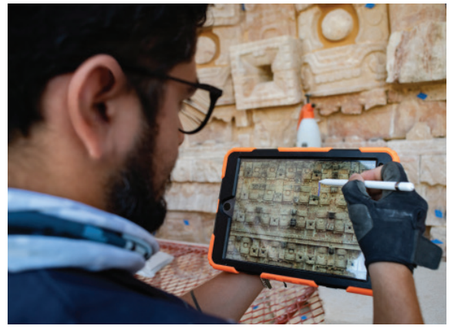


Imagen 5. Registro de estado de conservación de los mosaicos de piedra en fichas de registro digitalizadas en iPad, aparece el restaurador José Manuel Olvera. Proyecto Conservación Ruta Puuc, 2022-2023. Crédito: INAH-CND-Cuauhtémoc Moreno. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Difusión digital. Acceso al patrimonio cultural: El INAH ha hecho uso de las plataformas digitales para llevar el patrimonio cultural mexicano a audiencias globales. El museo virtual, las exposiciones en línea y el uso de realidad aumentada (AR) y realidad virtual (VR), han transformado la experiencia de los visitantes, permitiéndoles interactuar con el patrimonio cultural de manera inmersiva. Estos avances dan oportunidad a las personas de "viajar en el tiempo" y descubrir el pasado de una manera interactiva, lo que democratiza el acceso al patrimonio, haciéndolo accesible a miles de personas.

4. Desafíos y oportunidades de la integración tecnológica en la conservación

Si bien la integración de nuevas tecnologías ha aportado enormes beneficios a la conservación del patrimonio cultural, también presenta desafíos que deben ser abordados de manera estratégica.

Uno de los principales desafíos es la brecha tecnológica que existe entre las distintas instituciones, regiones y comunidades en México. Muchas de las tecnologías más avanzadas están concentradas en grandes centros urbanos o en instituciones de prestigio internacional, lo que limita su implementación en comunidades más remotas o menos desarrolladas tecnológicamente. Esta disparidad en el acceso a las herramientas tecnológicas, podría generar una desigualdad en la conservación y difusión del patrimonio cultural.

Un desafío importante es el costo elevado de la tecnología avanzada, que no siempre está al alcance de las instituciones encargadas de la preservación del patrimonio. La adquisición de equipos de escaneo 3D, drones, o sensores ambientales, y la capacitación del personal para su uso adecuado, suponen una inversión significativa.

Otro reto importante es la dependencia de las tecnologías digitales, lo que podría dar lugar a una desconexión con las técnicas tradicionales de conservación, que han sido fundamentales durante siglos. Las técnicas tradicionales de restauración y conservación deben seguir siendo parte de las prácticas del INAH y no ser reemplazadas completamente por la digitalización, pues las dos deben complementarse para obtener los mejores resultados en la preservación del patrimonio.

5. Propuestas para el futuro de la conservación del patrimonio cultural mexicano

Una de las primeras acciones a tomar es la descentralización del acceso a las tecnologías avanzadas, asegurando que los investigadores y conservadores en las regiones más remotas, también tengan acceso a las herramientas necesarias para conservar el patrimonio cultural de manera efectiva. Esto incluye la capacitación continua del personal y la creación de recursos tecnológicos regionales, que puedan apoyar a las instituciones más pequeñas en el uso de la tecnología.

El INAH puede fomentar colaboraciones internacionales con otras instituciones de investigación, universidades y empresas tecnológicas, para desarrollar y compartir innovaciones tecnológicas en el campo de la conservación. Además, se podría explorar la creación de proyectos colaborativos, para reducir el costo de la implementación de tecnologías avanzadas.

Finalmente, es esencial que el futuro de la conservación del patrimonio cultural mexicano se base en una armonía entre los métodos tradicionales de conservación y las tecnologías emergentes. La sinergia entre lo antiguo y lo nuevo será clave para asegurar que el patrimonio cultural se conserve de manera efectiva, sin perder su valor histórico y cultural.

6. Estudio de caso: Digitalización de códices y escaneo 3D de monumentos

Un ejemplo destacado del INAH en el uso de la tecnología para la conservación del patrimonio cultural, es el proyecto de digitalización de códices y escaneo 3D de monumentos. Estos proyectos no solo permiten la preservación de documentos extremadamente frágiles como los códices, sino también facilitan el acceso global a estos bienes culturales mediante plataformas digitales.

La digitalización de estos códices ha permitido que investigadores y académicos de todo el mundo, puedan estudiarlos y consultarlos sin riesgo de deterioro; mientras que las réplicas virtuales permiten crear nuevas formas de interacción con el público, fomentando un mayor interés y comprensión sobre las culturas prehispánicas e históricas de México.



Imagen 6. Registro fotográfico de la Casa de las Águilas. De izquierda a derecha Néstor Santiago, Michelle De Anda y Omar Mendoza. Foto Proyecto Templo Mayor-INAH. Crédito: INAH-CND-Cuauhtémoc Moreno. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

7. Conclusión

El INAH, a lo largo de sus 86 años de existencia, ha demostrado que la integración de las nuevas tecnologías en la conservación del patrimonio cultural, es crucial para asegurar que el legado de México continúe siendo una fuente de conocimiento y orgullo para las generaciones futuras. Sin embargo, es necesario seguir avanzando en la implementación de estas tecnologías, superar los retos relacionados con la brecha tecnológica y garantizar que la conservación se mantenga fiel a los métodos tradicionales, que han demostrado su eficacia a lo largo del tiempo. El futuro de la conservación del patrimonio cultural mexicano depende de un esfuerzo colectivo por equilibrar la tradición y la innovación tecnológica, asegurando que las huellas del pasado sigan vivas y accesibles para el presente y el futuro. Se trata, entonces, de nuevas fronteras para la conservación y difusión del legado mexicano.

Tengo el placer de presentar a mi colega del Ministerio de Cultura, Isabelle Chave, subdirectora de Monumentos Históricos y de los Sitios Patrimoniales. Isabel es una gran profesional del patrimonio y no podía abrir esta presentación sin hablarles de las grandes líneas de la protección del patrimonio material mobiliario y bienes raíces en Francia. Isabelle Chave se graduó de la École Nationale des Chartes, la gran escuela en Francia que forma a los archivistas y que dirigió al inicio de su carrera, desempeñándose en los servicios departamentales de archivos para unirse luego a los archivos nacionales como jefe del Departamento Ejecutivo y Legislativo, y posteriormente unirse a la administración central del Ministerio de Cultura.

En esta área, estuvo en el seno del servicio encargado, especialmente, de la aplicación de la Convención de la UNESCO sobre el patrimonio cultural inmaterial, cuya política desarrolló durante varios años, y he tenido la suerte de contar con ella en la época actual. Isabelle Chave es la subdirectora de Monumentos Históricos y de los Sitios Patrimoniales, oficina encargada de la protección, conservación y restauración del patrimonio material en Francia, y estoy muy contento de que esté con nosotros, para aportar todos los conocimientos necesarios sobre esta actividad esencial del Ministerio de Cultura.

Moderador: **Dr. Pascal Liévaux**

Conferencia Magistral
Conservación del patrimonio cultural de Francia: disposiciones generales nuevas y problemas actuales

Diplomada Isabelle Chave

En estas jornadas de estudio deseo presentar un breve panorama del patrimonio cultural protegido en Francia en 2025, sobre el cual interviene legalmente el Ministerio de Cultura. Mencionaré también las nuevas disposiciones legislativas y reglamentarias instauradas estos últimos años, para reforzar la protección y la conservación del patrimonio cultural, así como los instrumentos y medios utilizados para su conservación. Es sobre este patrimonio cultural que se centran los programas de investigación fundamental, o aplicada, en ciencias del patrimonio (humanidades, ciencias experimentales o ciencias digitales), llevados a cabo en el seno de los laboratorios especializados operantes del Ministerio de Cultura o en el seno del Centro Nacional de Investigación Científica (CNRS, por sus siglas en francés) o de las instituciones universitarias, en colaboración, con frecuencia, de los servicios patrimoniales.

1. Algunas cifras clave

La parte legislativa del código del patrimonio y las estadísticas anuales de frecuentación de los sitios del Ministerio de Cultura, reflejan la gran diversidad de los campos de aplicación de las políticas públicas de conservación del patrimonio cultural en Francia, si está construido, es mueble o inmaterial.



Figura 1. El patrimonio.

La protección del patrimonio cultural

La protección de los monumentos históricos en Francia es, al igual que la recopilación y conservación de los archivos, una de las políticas patrimoniales más antiguas, que se remonta al primer tercio del siglo XIX, desde las primeras protecciones introducidas en 1840. En la actualidad, hay aproximadamente 45 mil edificios protegidos como monumentos históricos en todo el territorio nacional, de los cuales la mitad es propiedad pública. La mayor parte pertenece a las comunas y cerca del 80 por ciento de estos edificios protegidos están fechados desde la Edad Media hasta la Revolución Francesa. Estos inmuebles corresponden, sobre todo, a la arquitectura doméstica (castillos, palacios, mansiones y casas) y al patrimonio religioso (iglesias, capillas, abadías, templos, sinagogas y seminarios).



Pont du Gard (Gard), Ier siècle après J.-C.
Classement en 1840



Broderie dite « Tapisserie de Bayeux » (Calvados), vers 1100
Classement en 1840

Imagen 1. Puente del Gard, siglo I d.C. Clasificación (como Monumento Histórico) de 1840. (Pont du Gard.).
Imagen 2. Bordado (o tapiz) conocido como la "Tapicería de Bayeux" (Calvados), hacia 1100. Clasificación (como monumento histórico) en 1840. (Tapisserie de Bayeux.).

En cuanto a los objetos muebles protegidos por el título de monumentos históricos, actualmente son 280 mil repartidos equitativamente en inscritos y clasificados. Más del 85 por ciento de estos bienes inmuebles protegidos pertenecen a las colectividades territoriales o al Estado y casi el 80 por ciento de ellos son patrimonio religioso, aunque en los últimos decenios se ha dado reconocimiento a los objetos muebles pertenecientes al patrimonio industrial, científico o técnico. Tanto para los edificios como para los objetos, la protección se evalúa examinando un conjunto de criterios artísticos, científicos y técnicos, teniendo en cuenta las nociones de rareza, ejemplaridad, autenticidad o integridad de los bienes culturales.

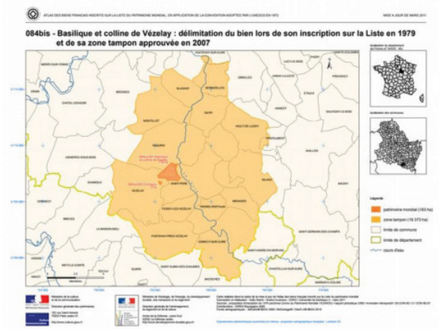
En muy pocos años, el Ministerio de Cultura ha implementado un nuevo dispositivo de protección, aún más exigente, a escala de conjuntos inmobiliarios más complejos llamados "dominios nacionales", creados en 2016 como ley LCAP (ley para la Libertad de Creación, Arquitectura y Patrimonio). Así, en 2024, por decreto del Consejo de Estado, fueron reconocidos entre estos dominios nacionales el castillo de Fontainebleau y el palacio de Versalles. Después de las 21 primeras clasificaciones nuevas, correspondientes sobre todo a los antiguos dominios de la Corona, elaboradas entre 2017 y 2024, el Ministerio de Cultura se comprometió a reconocer otros 29 dominios nacionales en todo el territorio francés.

Desde que se ratificó la Convención de la UNESCO sobre el Patrimonio Mundial de 1972, en 1975, el Estado ha seguido una política muy activa de inscripción de bienes

culturales en la Lista del Patrimonio Mundial. De esta manera, el Ministerio de Cultura se encarga de las candidaturas y del seguimiento de los bienes culturales, y el Ministerio de la Transición Ecológica y Solidaria (MTES) es responsable de las mismas misiones para los bienes naturales. El Ministerio de Cultura tiene bajo su cargo más de 40 bienes de naturaleza muy diferente, desde el monumento (como las catedrales), paisajes culturales enteros (como el valle del Loira) y cuevas ornamentadas, hasta centros urbanos (como los centros históricos de Burdeos, Estrasburgo o Lyon). Algunos de estos bienes pueden ser "en serie" (como las fortificaciones de Vauban) y transnacionales (como los Beffrois de Francia y Bélgica).

Volviendo a los dispositivos que dependen del derecho nacional, el Ministerio de Cultura continúa hoy con la política instaurada en los años sesenta por el ministro de Asuntos Culturales, André Malraux (1901-1976), cuyo objetivo era proteger los centros urbanos históricos, reconocidos hoy como "sitios patrimoniales notables", los cuales son más de mil en todo el territorio nacional, en la actualidad.

Asimismo, siempre en el campo de la preservación, el Ministerio de Cultura se comprometió muy pronto en la aplicación de la Convención de la UNESCO de 2003, para la salvaguardia del patrimonio cultural inmaterial. Esta política adopta la forma tanto de mantener un inventario nacional del patrimonio cultural inmaterial, continuamente enriquecido, como de apoyar numerosas candidaturas en las listas previstas por el organismo internacional. Un rasgo destacado de este corpus de prácticas, así reconocidas por la UNESCO para Francia, es el fuerte vínculo mantenido desde el origen con el patrimonio arquitectónico: el trazo de carpintería, el compañerismo, el arte de la piedra seca, el saber hacer de los talleres de catedrales o el saber hacer de albañiles y decoradores parisinos. Es evidente que la conservación del patrimonio construido, pasa también por la conservación de las técnicas tradicionales asociadas a la restauración.



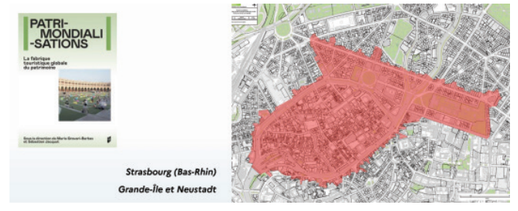


Figura 2. Basílica y colina de Vézelay.
Figura 3. Portada del libro: *Patrimondialisations. La fabrique touristique globale du patrimoine* (Patrimonialización. La fábrica turística global del patrimonio).

La política de restauración del patrimonio

Para orientar y priorizar su política de restauración, el Ministerio de Cultura publica cada cinco años una herramienta primordial: el balance sanitario de los 45 mil edificios protegidos, basado en un considerable trabajo de censo. El balance 2019-2024, que está

a punto de completarse, ha permitido establecer que el 36 por ciento de estos 45 mil inmuebles, está en buen estado; el 41 por ciento se encuentra en estado medio; el 18 por ciento está en mal estado y el 5 por ciento se halla en peligro. Partiendo de ese balance sanitario, es posible priorizar la investigación (estudios y diagnósticos), para definir después las intervenciones de conservación y restauración.

Cada año, en promedio, el número de obras de restauración del patrimonio inmobiliario o instrumental conducidas gracias a los créditos "monumentos históricos" del Ministerio de Cultura, se establece entre 8 mil y 8 mil 500 operaciones. Para ello, los conservadores regionales de los monumentos históricos, los arquitectos jefes de los monumentos históricos y los arquitectos de los edificios de Francia, pueden apoyarse en la experiencia permanente de varios centros de investigación especializados: el Laboratorio de Investigación de los Monumentos Históricos (LRMH), creado en 1970; el Centro de Investigación y Restauración de los Museos de Francia (C2RMF), fundado en 1998, o el Centro Interdisciplinario de Conservación y Restauración del Patrimonio (CICRP), creado en 2002.

La valorización del patrimonio

Los dispositivos de reconocimiento complementan estos instrumentos jurídicos de protección: la etiqueta "Arquitectura contemporánea notable", atribuida a edificios no protegidos en el título de monumentos históricos y fechados con menos de 100 años, esto es los más recientes; la etiqueta "Casas ilustres" o el sello "Jardín notable", también permiten movilizar los servicios públicos y a los propietarios privados para la conservación del patrimonio francés, en toda su diversidad.

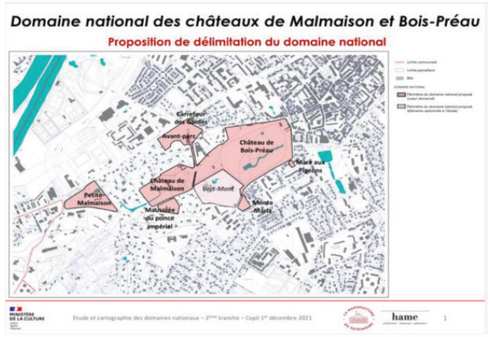


Figura 4. Museo Nacional de los castillos de Malmaison y Bois-Préau.

2. Nuevas disposiciones legales y reglamentarias

Gracias a la ley LCAP del 7 de julio de 2016, este último decenio se ha caracterizado por un refuerzo muy significativo del arsenal legislativo y reglamentario, en favor de la conservación del patrimonio cultural. Se trata de una dinámica esencial que permite apoyar la investigación, pero es necesario comenzar por consolidar el arsenal legislativo, con el fin de disponer de un marco reglamentario para intervenir.

Los organismos especializados

En 2016 se crearon instancias especializadas a nivel central y regional: la Comisión Nacional del Patrimonio y de la Arquitectura (CNPA), que comprende siete secciones, y las comisiones regionales del patrimonio y de la arquitectura (CRPA), que comprenden tres secciones, se establecieron y son consultados prácticamente todas las semanas en materia de creación, gestión y seguimiento de los documentos de urbanismo, o en materia de obras de protección, conservación o valorización del patrimonio cultural. Están presididas por un parlamentario (CNPA) y por representantes electos (CRPA), que tienen una visibilidad sobre los bastidores administrativos de la fábrica del patrimonio. Estas instancias están constituidas por representantes del Estado, por personalidades cualificadas, universitarios, investigadores, conservadores, arquitectos, así como por representantes de asociaciones o fundaciones especializadas en el patrimonio, con una visión muy participativa en la conservación del patrimonio.

Los dominios nacionales

En el mismo periodo se creó un nuevo régimen jurídico: los dominios nacionales, cuyo objetivo es proteger, mediante un estatuto particular, los conjuntos inmobiliarios, amplios o aislados, que tienen la particularidad de presentar un vínculo excepcional con la historia de la nación, y de los cuales el Estado es, al menos en parte, propietario. Se trata de grandes conjuntos históricos complejos, como el dominio nacional de Versalles, pero también pueden ser grandes monumentos aislados, como el Arco del Triunfo o el Panteón en París. Los efectos de este régimen jurídico son muy drásticos: cuando se aprueba el decreto en el Consejo de Estado, todos los derechos de propiedad estatal dentro del perímetro de estos dominios nacionales se clasifican automáticamente como monumentos históricos. Los derechos de paso que pertenezcan a terceros (colectividades o particulares), se inscriben inmediatamente en el título de monumentos históricos. Todos los derechos de propiedad del Estado pasan a ser inalienables y no edificables, y por último, también tiene el derecho preferente, en caso de necesidad, para consolidar el perímetro de estos dominios.

Los perímetros delimitados de los alrededores

Otra iniciativa, también introducida por la ley en 2016, permite consolidar y hacer que los habitantes acepten mejor el principio mismo de la protección de los monumentos históricos. Se trataba de redefinir las disposiciones que se aplican en torno a los monumentos históricos, para convertirlos en un verdadero instrumento de valorización del patrimonio cultural y de conservación. Alrededor de cada edificio monumento histórico se genera un círculo "automático" con un radio de 500 metros, dentro del cual todos los trabajos (restauración, rehabilitación, modificación, etc.) están sujetos a un control por parte de arquitectos funcionarios del Ministerio de Cultura (los arquitectos de los edificios de Fran-

cia), si estas obras son visibles al mismo tiempo que el monumento histórico. Estos espacios específicamente protegidos, denominados los "alrededores de monumentos históricos", afectan a cerca de 20 mil municipios en Francia. Desde la ley de 2016, es posible crear "perímetros delimitados de los alrededores" que restringen este control patrimonial cercano a los únicos espacios verdaderamente en "covisibilidad" con el monumento histórico, presentando una densidad patrimonial y una densidad de apuestas muy alta. Así, en más de 3 mil 100 "perímetros delimitados de los alrededores" se registraron alrededor de más de 5 mil monumentos históricos, en 2024. Las reglas que se aplican en términos de materiales, colores, tipos de dispositivos constructivos o tipos de restauración, siempre se imponen a los habitantes, pero de manera más específica.

Les sites patrimoniaux remarquables...



Strasbourg (Bas-Rhin)

Imagen 3. Los sitios patrimoniales notables...

Los sitios patrimoniales notables

Otra disposición renovada, los "sitios patrimoniales notables" (SPR), se aplica a escala de centros urbanos y no simplemente de monumentos. Esta disposición ha aclarado la protección en favor del patrimonio urbano y paisajístico, redinamizando una política lanzada en los años sesenta para preservar ciudades, pueblos o barrios, cuya conservación y restauración representa un interés público desde el punto de vista de la historia, de la arqueología y el paisaje. A escala de estos territorios específicos, determinados en el seno de grandes ciudades, de ciudades medianas o de pequeños pueblos rurales, se aplica una herramienta cartográfica extremadamente fina (plan de valorización de la arquitectura y del patrimonio, o plan de salvaguardia y de valorización), a la parcela catastral, que determina, con gran anticipación, el destino de cada elemento del patrimonio construido: conservación, modificación, restauración total, raspado, demolición, creación de espacios verdes, restitución de jardines, paseos, terrazas, etc. En el seno del sitio patrimonial notable, los administrados conocen las reglas de conservación que se

aplican al bien que habitan, sobre tal o cual parcela catastral. La leyenda gráfica de este mapa del SPR, permite identificar finamente los elementos patrimoniales notables a proteger. Este enfoque nacional está cambiando la forma en que se considera el patrimonio a nivel de ciudades y pueblos.

Los conjuntos históricos muebles

El patrimonio mueble también se ha beneficiado de una medida particularmente significativa, gracias a la ley de 2016. Este avance en materia de protección consiste en poder crear "conjuntos históricos muebles", imponiendo a su propietario (que puede ser el propio Estado) la conservación conjunta de objetos muebles, cuya coherencia e interés derivan del hecho mismo de estar reunidos desde el punto de vista de la historia, la historia del arte, la arqueología, la etnología o la ciencia. No sólo deben conservarse juntos, sino que, si el edificio en el que se encuentran está clasificado como monumento histórico, es posible crear una "servidumbre de mantenimiento en los lugares". Estas nuevas disposiciones son particularmente adecuadas para la salvaguardia del mobiliario histórico de los castillos, instrumentos de laboratorios científicos, muebles de casas de arquitectos o diferentes elementos de depósitos lapidarios, por mencionar los casos aplicados más recientemente.

3. Los dispositivos financieros innovadores

Los esfuerzos realizados para apoyar financieramente la protección, conservación y restauración del patrimonio, son sumamente importantes. También incluyen la investigación multidisciplinaria movilizada para la conservación del patrimonio. Los créditos "ordinarios" dedicados a los monumentos históricos, que permiten realizar todos los estudios previos, los diagnósticos especializados o las intervenciones de mantenimiento y restauración, se reparten entre una dotación para grandes proyectos y otra para gastos corrientes de mantenimiento y restauración.

Como ya se dijo, cada año se realizan unas 8 mil operaciones con esos fondos. Con algunas variantes debidas a grandes proyectos, el presupuesto ministerial superó en 2023 la barrera simbólica de los 400 millones de euros dedicados al patrimonio monumental, a los objetos inmobiliarios y al patrimonio instrumental protegido, como monumentos históricos.

El "loto del patrimonio"

Estos créditos son evidentemente muy significativos, pero el balance sanitario de los 45 mil monumentos históricos inmuebles muestra que no son suficientes. Al respecto, se crearon dispositivos innovadores para apoyar la conservación y restauración del patrimonio, buscando palancas más originales, como el "loto del patrimonio" (misión Patrimonio en peligro), que permite, desde 2017, destinar los ingresos de la Lotería Nacional a la con-

servación del patrimonio. Desde su creación ha apoyado la restauración de más de 980 sitios en Francia.



Figura 5. Plan de salvaguardia y mejora.

El "fondo de fomento del patrimonio"

Según un nuevo dispositivo de colaboración con las colectividades regionales, instaurado en 2018, si las regiones aportan al menos el 15 por ciento del importe de los trabajos sobre el inmueble protegido a título de monumentos históricos, los servicios patrimoniales del Estado pueden duplicar sus subvenciones. Este fondo de fomento del patrimonio se dirige a los municipios pequeños, en particular a los que tienen menos de dos mil habitantes en zonas rurales, que poseen un gran patrimonio cultural y no pueden contribuir por sí solos a su restauración.

Las suscripciones temáticas

También se han introducido recientemente suscripciones nacionales en beneficio de temas específicos. La suscripción nacional para el patrimonio religioso fue creada por la Ley de Finanzas de 2024, que prevé un tipo incrementado de reducción de impuestos sobre la renta, en beneficio de un fondo global gestionado por la Fundación del Patrimonio. El producto de esta colecta nacional se dedica exclusivamente a los edificios pertenecientes al patrimonio religioso (templos, sinagogas, iglesias, presbiterios, casas canónicas, etc.), asignados o no al culto. Estos edificios pueden o no estar protegidos como monumentos históricos, deben ser propiedad de personas públicas y estar situados en municipios con menos de 10 mil habitantes (menos de 20 mil en ultramar). Desde 2025, el Ministerio de Cultura ha ampliado la capacidad de recolección a otras fundaciones y asociaciones reconocidas de utilidad pública, para la salvaguardia del patrimonio.

En 2023, la suscripción en favor del pueblo mártir de Oradour-sur-Glane nació de una iniciativa de la Fundación del Patrimonio para organizar una colecta de donaciones entre el gran público, con el fin de apoyar financieramente la restauración del pueblo, propiedad del Estado e íntegramente clasificado como monumento histórico por la ley del 10 de mayo de 1946, tras la masacre perpetrada por los alemanes el 10 de junio de 1944. Esta subscripción tiene como objetivo financiar el nuevo plan director para el mantenimiento y la restauración de las ruinas del sitio.

4. Los grandes proyectos

De forma permanente, el Ministerio de Cultura lleva una decena de grandes proyectos que concentran todas las atenciones: los créditos, los efectivos, los programas de investigación, la mediatización, etc. La siguiente es una lista de los grandes proyectos que se realizan en la actualidad:

- Palais de la Cité, en París (región Île-de-France). Se busca restituir la articulación entre la Conciergerie y la Sainte Chapelle, corazón del poder en la época medieval.
- Abadía y prisión de Clairvaux (región Grand Est). Busca restaurar y encontrar un modo de reutilización de los edificios conventuales más grandes de Francia. Es propiedad del Ministerio de Cultura.
- Castillo de Gaillon (región de Normandía). Se trata de restaurar esta obra maestra de la arquitectura del Renacimiento, en el marco de una obra original sobre un monumento propiedad del Estado, confiada bajo arrendamiento a la comunidad.
- Catedral de Notre Dame de París (región Île-de-France). Una vez terminada la fase 2 de la obra, se pretende restaurar el coro y la sacristía, luego las grandes rosas del coro y los transeptos.
- Catedral de Nuestra Señora de la Asunción en Clermont-Ferrand (región Auvernia-Ródano-Alpes). Trabajo de restauración de la cubierta de plomo, entre otras cosas.
- Catedral de San Benigno en Dijon (región Borgoña-Franco Condado). Se trata de depositar, restaurar y subir la flecha medieval, que se inclina peligrosamente.
- Catedral de Saint-Pierre en Beauvais (región Hauts-de-France). Restauración de las cubiertas de esta catedral gótica y ponerlas a salvo contra los riesgos de incendio.
- Catedral de Nuestra Señora de la Asunción en Montauban (región Occitanie). Corrección de graves desórdenes estructurales vinculados a la construcción de un aparcamiento subterráneo bajo el atrio del templo.
- Catedral de Santa María la Mayor en Marsella (región Provenza-Alpes-Costa Azul). Recuperar las cubiertas de la cúpula del crucero, de las dos cúpulas del transepto y de las cuatro torres de escalera.
- Catedral de San Pedro y San Pablo en Nantes (región Pays de la Loire). Restauración completa del edificio después del incendio provocado en 2020.
- Basílica-catedral de Saint-Denis en Saint-Denis (región Île-de-France). Reconstrucción de la segunda flecha del macizo occidental, en el marco de una obra experimental que valoriza los conocimientos técnicos de la construcción.

En este contexto, la "red temática Maestro" se centrará en estos "grandes proyectos", en una colaboración multidisciplinaria e interdisciplinar entre el CNRS y el Ministerio de Cultura establecida para un periodo de cuatro años, de 2025 a 2028, como resultado de la "Obra científica de Notre Dame de París". Bajo la dirección de Pascal Liévaux y Maxime Lhéritier, los investigadores académicos y los profesionales del patrimonio (conservadores y arquitectos) colaborarán en torno a nueve grupos de trabajo temáticos: Estructuras, Madera y vigas; Emociones/Movilizaciones, Digital, Vidrio, Acústica y sensorialidad; Piedra, mortero, terracotas arquitectónicas; Metal y Decoraciones. Estas colaboraciones científicas permitirán abordar las patologías, los desafíos planteados por los grandes monumentos del patrimonio francés, como los retos de estructuras planteadas por las flechas de las catedrales, los desafíos digitales, los retos de acústica o restauración de las decoraciones o de las carpinterías.

5. Anticipación y gestión de riesgos

Después de esta presentación más general, evocar los trabajos en curso en materia de anticipación y gestión de riesgos permitirá acercarse un poco más a la temática de estos encuentros.

El plan de seguridad en catedrales

Desde octubre de 2019, tras los incendios de la Catedral de Notre Dame en abril de 2019 y la de Nantes en julio de 2020, el Ministerio de Cultura puso en marcha el plan "Seguridad catedrales" para asegurar las 87 catedrales y dos iglesias parroquiales pertenecientes al Estado. En 2023, el Ministerio de Cultura asignó 52 millones de euros para su conservación y protección, de los cuales 12 millones se destinaron a la seguridad contra incendios.

El plan de seguridad para las catedrales clasifica su estado según varios niveles de seguridad. Los resultados al 1 de enero de 2023, fueron: de las 87 catedrales y dos iglesias parroquiales pertenecientes al Estado, 19 gozaban de un nivel de seguridad "alto" (5 más desde 2020), 64 alcanzan el umbral reglamentario (6 más desde 2020), tres presentaban un nivel insuficiente (17 en 2020), por lo cual dos se cierran en caso de incendio (París y Nantes) y una en riesgo de hundimiento (Montauban).

Este plan nacional comprende 58 acciones, en particular sobre la superposición de los aleros (creación de tabiques para limitar la propagación del fuego en caso de incendio y facilitar la intervención de los socorristas), la generalización de las cámaras térmicas para detectar las zonas de calor antes de la aparición de humos de incendio, los retiros de algunas instalaciones eléctricas, una mejor formación del personal y la instalación de columnas secas para facilitar la intervención de los bomberos en caso de siniestro. Se persiguen tres objetivos: cumplir los requisitos de seguridad correspondientes a las obligaciones del umbral reglamentario; alcanzar el nivel elevado progresivamente, mediante obras adaptadas a las especificidades de cada catedral; organizar mejor la seguridad dentro de las catedrales, recurriendo a asociaciones reforzadas entre las direcciones

regionales de asuntos culturales, el clero afectivo cultual y los servicios departamentales de bomberos y de socorro (SDIS). Se ha realizado un esfuerzo importante para realizar documentos de gestión, compartidos con el conjunto de los actores que intervienen en las catedrales. Así, se observa una fuerte movilización para la elaboración de los planes de salvaguardia de los bienes culturales (PSBC) en caso de siniestro, 80 están formalizados frente a 13 en 2019. Por otra parte, con el fin de enmarcar las actividades que tienen lugar dentro de los edificios, un esfuerzo se centró en la redacción de un pliego de condiciones de explotación, ahora 59 han sido aprobados contra 16 en 2019.

La conciliación entre patrimonio construido y transición energética

Vemos todos los días cómo la búsqueda del rendimiento energético a toda velocidad puede constituir un riesgo para el patrimonio: aislamiento térmico desde el exterior, destrucción de las ventanas antiguas y sustitución por ventanas de PVC, instalación de ventilaciones y bombas de calor, entre otros. Con el convencimiento de que el hecho de conservar, restaurar, reutilizar y transmitir a las generaciones futuras el patrimonio construido, protegido o no, es un enfoque basado en principios ecológicos, el Ministerio de Cultura se ha comprometido, decididamente, en un proceso de conciliación y articulación de los dos objetivos de la transición ecológica y la preservación del patrimonio.

Conciliar el desarrollo de las energías renovables con la preservación del patrimonio

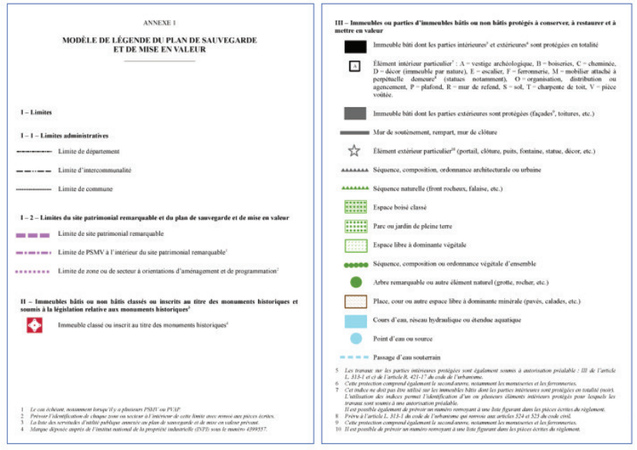
En noviembre de 2023 se finalizó la *Guía de inserción arquitectónica y paisajística de los paneles solares para uso de los servicios instructores y de los promotores de proyectos*. En los sitios protegidos por su interés patrimonial, esta guía ofrece a los promotores de proyectos, a los servicios instructores y a los arquitectos de edificios de Francia, recursos útiles en la elaboración e instrucción de los expedientes relativos a la instalación de paneles solares. El número de expedientes de instalaciones fotovoltaicas instruidos por las unidades departamentales de arquitectura y patrimonio, se ha multiplicado prácticamente por dos en el periodo de 2022 a 2023. La implantación de los equipos fotovoltaicos en el respeto del patrimonio reviste un carácter primordial.

Sensibilizar sobre la rehabilitación energética respetuosa de los edificios antiguos

Los edificios construidos antes de 1948 (llamados "edificaciones antiguas") tienen características intrínsecas (densidad, ventilación, inercia, variedad de materiales locales, técnicas tradicionales), que permiten alcanzar, previa adaptación, niveles satisfactorios de rendimiento energético, responder a los imperativos de reducción del consumo de los recursos naturales y de la producción de residuos, así como mantener cadenas artesanales no deslocalizables. Se trata de informar a los actores de la rehabilitación sobre la existencia de soluciones menos intrusivas, estandarizadas o seriales, en el edificio antiguo, y hacer hincapié en los dispositivos de aporte de energía.

Éste es el objetivo de la publicación de la guía denominada *Diagnóstico del desempeño energético y auditoría energética en viviendas. Trabajos de mejora del desempeño energético* (publicada en marzo 2025) o de la *Guía de rehabilitación energética de edificios antiguos* (publicada en 2025). Ese es también el objetivo de la realización de un compendio sobre la conservación de las carpinterías de ventanas en los monumentos históricos y los sitios patrimoniales.

A nivel europeo, el Ministerio de Cultura participa en la revisión de la norma europea EN 16883:2017 "Conservación del patrimonio cultural-Principios rectores para la mejora del rendimiento energético de los edificios de interés patrimonial" y apoya la elaboración de una herramienta nacional para medir el impacto del carbono en los edificios históricos.



ANNEXE 1

MODÈLE DE LÉGENDE DU PLAN DE SAUVEGARDE ET DE MISE EN VALEUR

I – Limites

I – 1 – Limites administratives

Limite de département

Limite d'intercommunalité

Limite de commune

I – 2 – Limites du site patrimonial remarquable et du plan de sauvegarde et de mise en valeur

Limite de site patrimonial remarquable

Limite de PSMV à l'intérieur du site patrimonial remarquable[1]

Limite de zone ou de secteur à orientations d'aménagement et de programmation[1]

II – Immeubles bâtis ou non bâtis classés ou inscrits au titre des monuments historiques et soumis à la législation relative aux monuments historiques[2]

Immeuble classé ou inscrit au titre des monuments historiques[3]

1. *Le cas échéant, notamment lorsqu'il y a plusieurs PSMV ou PVAP.*
2. *Prévoir l'identification de chaque zone ou secteur à l'intérieur de cette limite avec renvoi aux pièces écrites.*
3. *La liste des servitudes d'utilité publique annexée au plan de sauvegarde et de mise en valeur prévoit.*
4. *Marque déposée auprès de l'institut national de la propriété industrielle (INPI) sous le numéro 4394937.*

III – Immeubles ou parties d'immeubles bâtis ou non bâtis protégés à conserver, à restaurer et à mettre en valeur

Immeuble bâti dont les parties intérieures[5] et extérieures[6] sont protégées en totalité

Élément intérieur particulier[7] : A = vestige archéologique, B = boiseries, C = cheminée, D = décor (immeuble par nature), E = escalier, F = ferronnerie, M = mobilier attaché à perpétuelle demeure[8] (statues notamment), O = organisation, distribution ou agencement, P = plafond, R = mur de refend, S = sol, T = charpente de toit, V = pièce voûtée.

Immeuble bâti dont les parties extérieures sont protégées (façades[9], toitures, etc.)

Mur de soutènement, rempart, mur de clôture

Élément extérieur particulier[10] (portail, clôture, puits, fontaine, statue, décor, etc.)

Séquence, composition, ordonnance architecturale ou urbaine

Séquence naturelle (front rocheux, falaise, etc.)

Espace boisé classé

Parc ou jardin de pleine terre

Espace libre à dominante végétale

Séquence, composition ou ordonnance végétale d'ensemble

Arbre remarquable ou autre élément naturel (grotte, rocher, etc.)

Place, cour ou autre espace libre à dominante minérale (parvis, calades, etc.)

Cours d'eau, réseau hydraulique ou étendue aquatique

Point d'eau ou source

Passage d'eau souterrain

5. *Les travaux sur les parties intérieures protégées sont également soumis à autorisation préalable : III de l'article L. 313-1 et cf. de l'article R. 421-17 du code de l'urbanisme.*
6. *Cette protection comprend également le second œuvre, notamment les menuiseries et les ferronneries.*
7. *Cet index ne doit pas être utilisé sur les immeubles bâtis dont les parties intérieures sont protégées en totalité (noir). L'utilisation des indices permet l'identification d'un ou plusieurs éléments intérieurs protégés pour lesquels les travaux sont soumis à une autorisation préalable.*
8. *Il est possible également de prévoir un numéro renvoyant à une liste figurant dans les pièces écrites du règlement.*
9. *Prévu à l'article L. 313-1 du code de l'urbanisme qui renvoie aux articles 524 et 525 du code civil.*
10. *Cette protection comprend également le second œuvre, notamment les menuiseries et les ferronneries.*
11. *Il est possible de prévoir un numéro renvoyant à une liste figurant dans les pièces écrites du règlement.*

Arrêté ministériel du 10 octobre 2018 fixant le modèle de légende graphique des plans de sauvegarde et de mise en valeur (PVAP/PSMV)

Figura 6. Orden ministerial del 10 de octubre de 2018.

Formar y adaptar las competencias del personal del Ministerio de Cultura

Este fortalecimiento de las competencias sobre la adaptación del edificio antiguo a los desafíos climáticos y energéticos, riega las formaciones iniciales y continuas dispensadas por la dirección general de los patrimonios y de la arquitectura, sus establecimientos especializados (Escuela de Chaillot, Instituto Nacional del Patrimonio) y sus socios (Centro de Estudios y Experiencia sobre Riesgos, Medio Ambiente, Movilidad y Planificación-CEREMA; Asociación Nacional de Arquitectos de los Edificios de Francia, Asociación de Arquitectos del Patrimonio, Asociación de Casas Campesinas de Francia, y otros). Todos estos organismos enriquecen sus catálogos de formación sobre la integración de las energías renovables en los derechos del urbanismo y del patrimonio, o sobre la renovación energética de los edificios de interés patrimonial.



Etude d'une peinture murale (Colmar, Haut-Rhin)



Auscultation en nacelle des pierres de la façade occidentale de la cathédrale de Nîmes (Gard)

Imagen 4. Análisis de una pimtura mural (Colmar), Haut-Rhin.
Imagen 5. Análisis de la fachada occidental de la Catedral de Nimes (Gard).

A través de estos diferentes instrumentos jurídicos, financieros y doctrinales más recientes, el papel desempeñado por los profesionales que trabajan en los servicios del Ministerio de Cultura, es hoy extremadamente importante en materia de conservación del patrimonio construido o mobiliario. El Ministerio permite, también, favorecer el trabajo multidisciplinario diario de los arquitectos, ingenieros, conservadores, geotécnicos, inspectores, así como de todos los investigadores y académicos que se han especializado en las ciencias del patrimonio. El marco de intervención debe ser lo más sólido posible desde el punto de vista reglamentario, para que, en general, pueda ser propicio al establecimiento de colaboraciones científicas, tanto a nivel nacional como internacional.

*Fotografías/*slides*/gráficas tomadas de presentación compartida para el Encuentro por parte de Isabelle Chave.

Mesa 1
Gestión de riesgos, monitoreo e instrumentación del patrimonio cultural







Moderador: **M. en I. Enrique García Fuentes**
Presidente del XXVIII Consejo Directivo del Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Puebla (CICEPAC)

Secretario: **Dr. Alejandro Muñoz Muratalla**
Presidente del XXIX Consejo Directivo del CICEPAC

Para mayor detalle escanea el código QR y podrás ver la transmisión completa de esta sección del Encuentro México y Francia

Crédito: CICM-imagen en evento. Esta página





Experiencias en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios históricos
Dr. Hugo Oswaldo Ferrer Toledo
Doctor en Sismología por el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)



Preservación de edificios históricos mediante instrumentación y monitoreo periódico
Ing. Damien Tamagnan
Director General de Sixsense para México y América Latina, Grupo Vinci



Riesgos geotécnicos y patrimonio cultural en la Ciudad de México
Dr. Gabriel Yves Armand Auvinet Guichard
Investigador de tiempo completo en el Instituto de Ingeniería de la UNAM

Nota: Imágenes con enlace Web fueron transmitidas por INAH TV durante el evento realizado en el Auditorio Jaime Torres Bodet (Museo Nacional de Antropología).

Crédito: CICM-imagen en evento. Esta página
Excepto retratos oficiales de ponentes.

El Encuentro México-Francia, Innovación y uso de la tecnología para la conservación del patrimonio cultural es un foro para tratar un tema cada vez más relevante para los dos países. Por lo cual agradecemos profundamente al ingeniero Luis Rojas la invitación al Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Puebla (CICEPAC), a participar en este gran evento.

En el CICEPAC hemos tenido un eje guía en la ingeniería civil y su participación en la conservación del patrimonio, hecho que nos ayuda con nuestro texto a compartir con esta mesa, que se titula "Gestión de riesgos, monitoreo e instrumentación del patrimonio cultural".

Es importante destacar la colaboración de los ingenieros civiles en la conservación del patrimonio cultural y edificado, así como recordar que después de Italia, España y Francia, México cuenta con un relevante número de ciudades patrimonio cultural, que significa también una gran cantidad de experiencias para compartir.

Moderador: **M. en I. Enrique García Fuentes**

Experiencias en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios históricos

Dr. Hugo Oswaldo Ferrer Toledo

Introducción

Este artículo presenta una reflexión crítica sobre la vulnerabilidad sísmica de los edificios históricos. Se basa en experiencias acumuladas en México, especialmente en la ciudad de Puebla. Se revisa la evolución del concepto de vulnerabilidad sísmica (VS), desde enfoques empíricos hasta modelos probabilísticos más sofisticados. La vulnerabilidad sísmica depende de diversos factores. Entre ellos se encuentran el diseño estructural, los materiales, el tipo de suelo, las técnicas constructivas, las modificaciones acumuladas y el estado de conservación. Evaluar edificaciones patrimoniales presenta dificultades particulares. Estas dificultades se deben a su complejidad estructural, a la presencia de materiales originales y a las restricciones normativas que limitan su intervención. A través de casos reales se muestra una problemática recurrente. La falta de análisis dinámicos posteriores a las reparaciones, ha contribuido a la repetición de ciclos de daño-reparación. Esto ocurre sin una comprensión completa del comportamiento estructural. Para lograr una evaluación más precisa, se propone combinar métodos cualitativos, analíticos e históricos. También se recomienda el uso de instrumentación especializada. El texto subraya que la preservación del patrimonio no puede desvincularse de la seguridad estructural. Tampoco puede separarse del objetivo fundamental de preservar vidas. Ambas dimensiones son parte de una responsabilidad compartida. Esta responsabilidad debe orientarse hacia la protección del bien común.

Conceptos fundamentales de la vulnerabilidad sísmica

La VS se refiere al grado de susceptibilidad que presenta una estructura para sufrir daños cuando es sometida a exigencias sísmicas. Esta medida permite anticipar el comportamiento esperado de un inmueble ante un sismo, considerando una combinación de factores inherentes a su diseño, materiales, técnicas constructivas, mantenimiento, modificaciones acumuladas y entorno geotécnico. Evaluar la VS se ha convertido en un componente esencial para establecer prioridades de intervención, diseñar estrategias de mitigación del riesgo y formular políticas públicas en materia de protección civil.

El interés por cuantificar la vulnerabilidad estructural surgió como una necesidad práctica luego de observar, en múltiples terremotos destructivos, que estructuras aparen-

temente similares experimentaban niveles muy distintos de daño. Los primeros trabajos sistemáticos en este campo datan de mediados del siglo XX. Uno de los estudios pioneros fue el de Freeman (1932) en California, quien propuso una metodología empírica para correlacionar los daños observados con el tipo de estructura y la intensidad sísmica.

Durante las décadas de 1960 y 1970, instituciones como el US National Bureau of Standards y el Earthquake Engineering Research Institute (EERI) comenzaron a desarrollar modelos más estructurados de evaluación de vulnerabilidad, principalmente orientados a edificios de mampostería y concreto reforzado. En Europa, un avance significativo fue el método desarrollado por Benedetti y Petrini (1984), quienes propusieron una escala adimensional del 0 (sin daño) al 10 (colapso total), ampliamente adoptada en contextos mediterráneos y latinoamericanos. Esta herramienta permite estimar el daño esperable para distintos niveles de aceleración sísmica, facilitando la comparación entre edificaciones y la priorización de refuerzos o intervenciones.

En América Latina, y particularmente en México, el concepto de VS adquirió protagonismo tras el terremoto de 1985 en la Ciudad de México. A raíz de este evento, se intensificaron los estudios sobre el comportamiento sísmico de edificaciones existentes, muchos coordinados por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica (SMIS). Autores como Esteva (1996) y Ordaz *et al.* (2000) desarrollaron enfoques probabilistas y deterministas que integran variables estructurales, exposición al peligro y consecuencias sociales y económicas, aportando una visión más integral del riesgo sísmico urbano.

En resumen, la evolución del concepto de VS ha transitado de enfoques empíricos a modelos cada vez más complejos, que consideran múltiples dimensiones del riesgo, lo que resulta particularmente relevante en el análisis de edificaciones históricas donde la protección del patrimonio y la seguridad estructural deben evaluarse simultáneamente.

Algunos conceptos necesarios adicionales

La figura 1 muestra el espectro de diseño sísmico, que representa el movimiento del suelo durante un movimiento telúrico y se emplea para el diseño sísmico de edificios. Tiene dos componentes: el vertical, muestra la aceleración que se presenta en el terreno (S) y, a su vez, se transmite al edificio; mientras que el horizontal está relacionado con el periodo dominante del suelo (T). Estos dos conceptos son clave en el diseño sísmico actual.

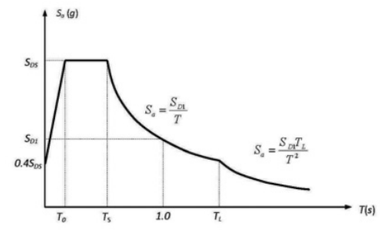


Figura 1. Espectro de diseño sísmico. Fuente: Comisión Federal de Electricidad. (2018). Capítulo 4: Clasificación de suelos. En *Manual de obras civiles: diseño de cimentaciones*. CFE.

Los espectros de diseño sísmico deben representar el movimiento sísmico de un sitio específico. Edificios de mucha importancia en costo, en el servicio que proveen o por su habitabilidad, pueden justificar fácilmente la inversión de espectros realizados *ad hoc*. Desafortunadamente, el costo que implica la obtención de espectros de sitio para un solo lugar, aún es alto en nuestros días. Por ello, los tipos de suelo se agrupan de acuerdo con sus propiedades dinámicas, siempre buscando un comportamiento similar. La clasificación más común en México se ordena en tres grupos que van de I a III, siendo el I el más firme y el III el menos firme (CFE, 2018). Esta clasificación de suelos provee valores de periodo y aceleración que permiten construir un espectro de diseño para una zona dada. Estos valores cambian para los diferentes centros urbanos de México.

Tipo	a0	c	Ta	Tb	r
I	0.05	0.18	0.15	0.6	0.5
II	0.09	0.32	0.2	1.5	0.67
III	0.11	0.4	0.5	2.5	1

Tabla 1. Espectros de diseño sísmico para la ciudad de Puebla. Fuente: Comisión Federal de Electricidad. (2018). Capítulo 4: Clasificación de suelos. En *Manual de obras civiles: diseño de cimentaciones*. CFE.

Para el caso de la ciudad de Puebla, los espectros de diseño respetan esta misma nomenclatura y se presentan en la Tabla 1. Vale la pena aclarar que los espectros de diseño sísmico para la ciudad, corresponden a un paso previo a la evolución más reciente que existe en materia de diseño sismorresistente.

Como se mencionó previamente, el componente horizontal del espectro de diseño muestra el periodo con el que se mueve el suelo. Este dato resulta de crucial importancia, pues el periodo natural del suelo no debe ser igual al periodo del edificio que sustenta, o se generará el fenómeno de resonancia, cuya última consecuencia es el colapso.

Este comportamiento dinámico de un edificio se debe considerar durante el diseño sismorresistente, pues todos los objetos vibran sin importar qué tan simples o complejos sean (Figura 2). Entre más complejos, también sus propiedades dinámicas se hacen más complejas. En la figura 2.a se observa un cubo que representa a las estructuras simples que vibran naturalmente. Su periodo dominante de vibrar es relativamente sencillo de obtener. En la figura 2.b vemos muchos cubos del mismo tamaño, que en conjunto representan una estructura más compleja, como una iglesia. A diferencia del primer ejemplo simple, ahora cada elemento (torres, cúpulas, naves) tiende a moverse de forma distinta. Si además el suelo no actúa como un modelo unidimensional, sino bidimensional, se incrementa la probabilidad de acoplamiento de modos de vibración.

Esto hace que los edificios antiguos, grandes, sin refuerzo y de comportamiento complejo sean más vulnerables a los sismos, que los edificios más modernos. Por ello, se requiere revisar su VS para tener la certeza de hasta qué niveles de aceleración se pueden resistir en un determinado escenario sísmico.

En edificios tan complejos como los templos antiguos, cada una de sus partes, como lo son campanarios, torres, cúpulas, naves, etc., tienden a comportarse de manera independiente, por lo que algunos de sus elementos podrían entrar en resonancia, colap-

sándose y producir un efecto progresivo que culminaría con la pérdida del inmueble y de su cultura asociada.

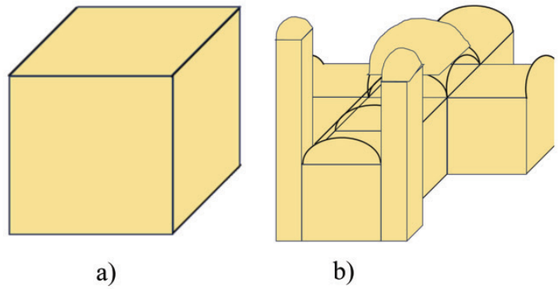


Figura 2. En términos de su geometría, se muestra un: a) Cuerpo simple. b) Cuerpo complejo. Fuente: Elaboración propia.

Los nuevos edificios se diseñan con espectros de diseño sísmico actualizados e, incluso, algunos con espectros ad hoc. Pero en los inmuebles históricos la única opción que tenemos es revisar su comportamiento, su VS y reforzarlos. Sin embargo, no siempre pueden ser intervenidos por completo. En el caso de la ciudad de Puebla, dado que desde 1987 fue declarada Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO, existen restricciones para los inmuebles del área protegida; por ejemplo, la iglesia de la Compañía de Jesús tiene contrafuertes "aparentes", como exige el convenio de La Haya. No se pueden hacer intervenciones permanentes; las que se apliquen deben ser reversibles hasta que se establezca un método compatible con su historia, arquitectura y materiales.

Métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica

La evaluación de la VS es fundamental para desarrollar estrategias de mitigación de riesgos y planificar adecuadamente la preparación ante eventos sísmicos. Esta planificación puede incluir acciones como la mejora de los códigos de construcción, la identificación de zonas de alto riesgo sísmico y la implementación de medidas de seguridad y respuesta. En el caso de las construcciones modernas, esta necesidad se comprende con mayor facilidad, ya que se asocian de manera implícita con los nuevos reglamentos y normativas. Sin embargo, no siempre se percibe la complejidad que implica analizar edificaciones antiguas, las cuales difícilmente cumplen con los requisitos establecidos en los códigos actuales para acciones accidentales. En estos casos, se deben generar especificaciones particulares para su intervención. Es por ello que no debe olvidarse la importancia de mitigar el daño en construcciones históricas, ya que estas edificaciones resguardan la identidad de los pueblos y reflejan su cultura.

La VS se refiere al grado de daños, o pérdida, a que está sujeta determinada obra o elemento a causa de un sismo de una magnitud e intensidad dada, expresada generalmente en una escala que varía de 0 (ningún daño) a 10 (colapso y pérdida total).

La VS puede estar determinada por una variedad de factores, como son la calidad de

la construcción, la ubicación del inmueble, exposición a peligros sísmicos y la capacidad de respuesta ante un evento sísmico. Puede variar significativamente entre diferentes estructuras, y puede influir en la cantidad de daños y pérdidas que ocurren durante un terremoto.

Una forma de estudiar la vulnerabilidad sísmica, independientemente del método aplicado, es la creación de las curvas de VS que se trazan sobre un plan coordenado x-y.

En la figura 3 se muestra como ejemplo una gráfica de VS. El eje vertical indica el nivel de daño. Esquemáticamente se muestran dos fotos reducidas del caso real de la iglesia del Perpetuo Socorro, en Puebla, que se colapsó debido al sismo del 28 de agosto de 1973.

Hablando del eje vertical, la figura de abajo muestra la iglesia aún en servicio, sin daño, mientras que la superior corresponde a la misma iglesia, pero después del sismo referido. Esto representa que entre más abajo está del eje, menos daño se tiene en el inmueble analizado.

Con lo que respecta al eje horizontal, se muestran los esquemas de dos pequeños registros sísmicos. El más pequeño está a la izquierda, mientras que el de mayor intensidad está a la derecha. Esto representa el incremento de la intensidad percibida en un sitio específico.

Dado lo descrito acerca de nuestro plano ordenado, para un inmueble en dado, podrá asignarse un valor de daño vs. un valor nominal de la intensidad registrada. De esta forma, una estructura podría dañarse con poca intensidad y, por tanto, su curva tendría una disposición muy vertical. Si, por el contrario, el inmueble no se daña con valores de intensidad importantes, su curva tendería a ser más horizontal.

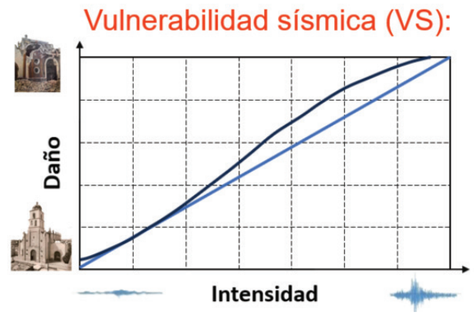


Figura 3. Ejemplo de una gráfica de Intensidad-Daño. Fuente: Elaboración propia.

Si la curva de daño es muy vertical, el edificio tolera muy poco rango de intensidad antes de colapsar.

La evaluación de la vulnerabilidad sísmica puede abordarse desde diversas metodologías, cada una con diferentes niveles de complejidad, precisión y aplicabilidad, según el tipo de estructura y el contexto del análisis. En general, se pueden organizar en métodos empíricos, métodos analíticos, probabilísticos y mixtos. A continuación se describen algunos métodos comúnmente empleados:

1. Método geométrico (o cualitativo visual). Este enfoque se basa en la observación directa de las características geométricas, estructurales y constructivas de un edificio, así como de los daños visibles existentes o pasados, con el fin de asignar una clasificación de vulnerabilidad. Es particularmente útil en etapas preliminares o en contextos donde no se dispone de planos estructurales o información detallada. Se utilizan listas de verificación (*checklist*) y formularios estandarizados, como los propuestos por Benedetti y Petrini (1984), o adaptaciones locales como las del Proyecto RISK-UE en Europa (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

2. Modelado analítico. Este método utiliza herramientas de análisis estructural mediante elementos finitos o modelos de masas concentradas, con el objetivo de simular el comportamiento dinámico de una edificación ante acciones sísmicas. Permite obtener parámetros como desplazamientos, esfuerzos internos, concentraciones de daño y modos de colapso, lo que posibilita una estimación cuantitativa y detallada de la vulnerabilidad. Es comúnmente utilizado en estructuras complejas, patrimoniales o de alto valor social, y ha sido aplicado por instituciones como el Instituto de Ingeniería de la UNAM en análisis avanzados de edificios históricos (Tena-Colunga, 2004).

3. Recopilación histórica de daños. Este método se basa en el análisis documental y sistemático de daños observados en estructuras similares durante sismos anteriores, a fin de extrapolar comportamientos esperados en futuros eventos. Se emplean catastros de daños, bases de datos sísmicas, registros fotográficos y crónicas históricas. Este enfoque es particularmente valioso en ciudades con una larga historia sísmica documentada, como Puebla o la Ciudad de México (Ordaz *et al.*, 2000).

Un ejemplo destacado en este sentido es el trabajo de Rivera Valdés y Ferrer (2019), quienes presentaron una base de datos georreferenciada de daños estructurales en edificaciones de la ciudad de Puebla, recopilada a partir de eventos sísmicos ocurridos entre 1973 y 2017. Esta base de datos incluye información detallada sobre el tipo de daño, la ubicación geográfica, el tipo de construcción y las características sísmicas de cada evento, lo que permite realizar análisis espaciales y estadísticos para identificar patrones de vulnerabilidad y priorizar intervenciones de mitigación.

4. Comparación de periodos y aceleraciones (evaluación modal simple). Este método consiste en comparar el periodo fundamental de vibración de la estructura con los periodos dominantes del suelo, estimados a partir de registros sísmicos o microtremores. Si hay coincidencia o cercanía entre estos valores, existe un riesgo elevado de resonancia estructural, lo cual incrementa significativamente la vulnerabilidad (Reinoso y Ordaz, 1999).

Cada uno de estos métodos puede ser utilizado de forma independiente o complementaria, dependiendo del nivel de información disponible, los recursos técnicos y los objetivos del estudio. En el caso de edificaciones históricas, una combinación de métodos cualitativos y analíticos suele ofrecer los resultados más confiables, al integrar la sensibilidad patrimonial con criterios técnicos de evaluación estructural.

Vale la pena mencionar que la existencia de nuevas herramientas tecnológicas de análisis, como la Inteligencia Artificial (IA), están produciendo una evolución, incluso en los métodos más básicos, por lo cual no debemos sorprendernos de que nos reencontremos con algunos métodos que pudieron considerarse antiguamente como obsoletos.

Caso de estudio: Iglesia de San Francisco, Puebla

Este edificio histórico ubicado en zona de suelo blando, ha sido afectado en múltiples eventos sísmicos: 1973, 1999 y 2017. En cada ocasión, las reparaciones fueron de acuerdo con la ciencia y tecnología disponible, y no se realizó una reevaluación integral del comportamiento dinámico posterior a las intervenciones. A la fecha, no se ha realizado ningún análisis completo del templo de San Francisco, considerando las modificaciones debidas a sus reparaciones pasadas.

Existe evidencia de que las reparaciones por sismos previos, han condicionado el tipo de falla observada en el siguiente evento sísmico. Es claro que, con las distintas reparaciones aplicadas, se han modificado las propiedades dinámicas del templo, entre ellas la rigidez de algunos elementos y sus correspondientes periodos de vibración natural.

El ciclo de daño-reparación-daño continúa debido a la falta de estudios completos sobre su nuevo estado estructural tras cada evento.

Conclusiones

Los edificios históricos requieren una visión interdisciplinaria para su preservación. La instrumentación, aunque costosa, proporciona datos reales que permiten evaluar adecuadamente los riesgos. El uso de métodos combinados y un enfoque integral es clave para reducir la vulnerabilidad futura. Además, se requiere una mayor formación de especialistas y acceso a tecnologías accesibles.

El análisis de la VS en edificios históricos no puede limitarse a la reparación de daños visibles. Es imprescindible incorporar evaluaciones dinámicas, instrumentación y memoria técnica. La experiencia adquirida en México demuestra la necesidad urgente de políticas públicas que faciliten el acceso y la intervención responsable en estos inmuebles.

Fuentes de información

Benedetti, D. y Petrini, V. (1984). *On the seismic vulnerability of masonry buildings: a macroseismic approach*. Proceedings of the 7th European Conference on Earthquake Engineering, Atenas, Grecia.

Calvi, G. M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J. J., Restrepo-Vélez, L. F. y Crowley, H. (2014.) Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(3), pp. 1027-1050.

Comisión Federal de Electricidad. (2018). Capítulo 4: Clasificación de suelos. En *Manual de obras civiles: diseño de cimentaciones*. CFE.

Comisión Federal de Electricidad. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo*. Ciudad de México, CFE.
Esteva, L. (1996). Evaluación de la vulnerabilidad sísmica. *Ingeniería Sísmica*, 54, pp. 21-34.
Ferrer Toledo, H. O. (2020). Evaluación de la vulnerabilidad sísmica en edificios históricos. *Revista de la Facultad de Ingeniería BUAP*, (19), pp. 55-62.
Ferrer Toledo, H. O. (2022). *Métodos instrumentales y análisis dinámico en inmuebles patrimoniales*. Segundo Congreso Internacional de Ingeniería Civil en Ciudades Patrimonio Mundial.
Freeman, J. R. (1932). *Earthquake Damage and Earthquake Insurance: Studies of a Rational Basis for Earthquake Insurance*. New York. McGraw-Hill Book Company.
Gobierno del Estado de Puebla. (2017). Normas Técnicas para Diseño por Sismo del Municipio de Puebla Complementarias del Libro Tercero Capítulo 17 del Código Reglamentario para el Municipio de Puebla. *Periódico Oficial del Estado de Puebla*, viernes 7 de abril de 2017, Tomo DIV, Núm. 5, Duodécima sección, pp. 8-34.
Milutinovic, Z. y Trendafiloski, G. (2003). *RISK-UE Project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns*. European Commission, EVK4-CT-2000-00014.
Municipio de Puebla. (2017). *Código Reglamentario para el Municipio de Puebla (COREMUN)*. Puebla: H. Ayuntamiento del Municipio de Puebla. Última reforma: 2017.
Ordaz, M., Pérez-Rocha, L. E. y Singh, S. K. (2000). Estimación de pérdidas probables por sismos en la Ciudad de México. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 62, pp. 25-48.
Reinoso, E. y Ordaz, M. (1999). Spectral amplification in Mexico City: A comparison between observations and predictions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(6), pp. 1372-1389.
Rivera Valdés, J. L. y Ferrer, H. O. (2019). *Base de datos georreferenciada de daños estructurales en edificaciones de la ciudad de Puebla*. Actas del XXII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Monterrey, México.
Tena-Colunga, A. (2004). Nonlinear dynamic analysis of historical masonry buildings: A review. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 70, pp. 23-48.

Preservación de edificios históricos mediante instrumentación y monitoreo periódico

Ing. Damien Tamagnan

Buenas tardes a todos.
Me da mucho gusto estar aquí. Gracias a la arquitecta Valeria Valero por la invitación a este Encuentro México y Francia, Innovación y uso de la tecnología en la conservación del patrimonio cultural.

Me gustaría agradecer también a los ingenieros Enrique García y Luis Rojas, por impulsarme a participar y por moderar esta sesión.

Hoy hablaré sobre preservación de edificios históricos mediante instrumentación y monitoreo periódico, un tema muy importante para nosotros en la empresa Sixense, que forma parte del grupo francés Vinci Construction, dedicada a la instrumentación geotécnica, estructural y ambiental tanto en la fase de construcción como en la de operación de obras. Esto es especialmente relevante para la conservación de edificios históricos.

El tema central es la preservación de edificios históricos mediante instrumentación y monitoreo periódico. En algunos casos se requiere instrumentación en tiempo real, por ejemplo, durante la construcción de una obra colindante con un edificio histórico. En otros casos, el monitoreo se realiza a largo plazo para observar el comportamiento estructural con el tiempo.

La presentación está organizada en cuatro partes:

- ¿Qué es la instrumentación y cuándo interviene durante la operación de edificios históricos?
- Dos casos de éxito de monitoreo de edificios históricos: uno en México y otro en Francia.
- Nuevas técnicas como el radar satelital InSAR, aplicado al monitoreo histórico de 115 escuelas secundarias en París.
- Conclusiones.

¿Qué es la instrumentación y cuándo interviene durante la operación de edificios históricos?

La instrumentación combina conocimientos teóricos y prácticos para utilizar dispositivos y técnicas, que nos permiten obtener información cualitativa y cuantitativa sobre el comportamiento de una estructura. Esto es clave para evaluar su seguridad y tomar acciones preventivas o correctivas, tanto en la fase de construcción como en la de operación.



Imagen 1. Teodolito automático midiendo 24/7 la Catedral de Guadalajara durante el paso de la tuneladora de la Línea 3 del Metro. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/4jC5mv3HE5Y?si=mVDV663Oiwe14lpr&t=1852*

Por ejemplo, durante una excavación cerca de un edificio histórico como la Catedral de Guadalajara, de la que hablaremos más adelante, es crucial medir con precisión los efectos en la estructura. Esto permite emitir alertas tempranas y, si es necesario, modificar el procedimiento constructivo.

¿Cuándo interviene la instrumentación en edificios históricos? Interviene principalmente en tres momentos:

1. Durante construcciones colindantes. Un ejemplo es el convento de los Jacobinos en Rennes, Francia, donde se construyó un centro de congresos alrededor y debajo del edificio histórico. Se utilizó instrumentación en tiempo real para mitigar los riesgos de integridad estructural durante la excavación.



Imagen 2. Teodolito automático midiendo 24/7 el convento de los Jacobinos de Rennes durante toda la obra.

2. Para el seguimiento de patologías. La instrumentación permite monitorear cambios en las patologías estructurales ya detectadas por ingenieros y arquitectos, ayudando a prevenir su evolución.

3. Durante restauraciones. Sirve para garantizar la seguridad del público y evaluar la evolución de las restauraciones a largo plazo.

Dos casos de éxito de monitoreo de edificios históricos: uno en México y otro en Francia

Primer caso: la Línea 3 del Metro de Guadalajara. El proyecto conecta Zapopan con Tlaquepaque a través de viaductos y un túnel de 5.4 kilómetros en el centro de la ciudad. Este túnel pasa por una zona con importantes edificios históricos, incluyendo la Catedral Metropolitana de Guadalajara.



Figura 1. Edificios catalogados del centro histórico de Guadalajara ubicados en la zona de influencia de los trabajos. En rojo, la traza de la tuneladora. Fuente: Elaboración propia a partir de Google MyMaps. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/4jC5mv3HE5Y?si=QfSkG8SDKKshFIAa&t=2222*

Para mitigar riesgos, se implementó un plan de monitoreo con instrumentos como teodolitos automáticos, medición de prismas 24 horas los siete días de la semana (24/7), electroniveles para detectar asentamientos diferenciales y geófonos para registrar vibraciones. Todos los datos se enviaban en tiempo real a una base central, lo que permitía a los actores involucrados tomar decisiones inmediatas para proteger la integridad de los edificios.

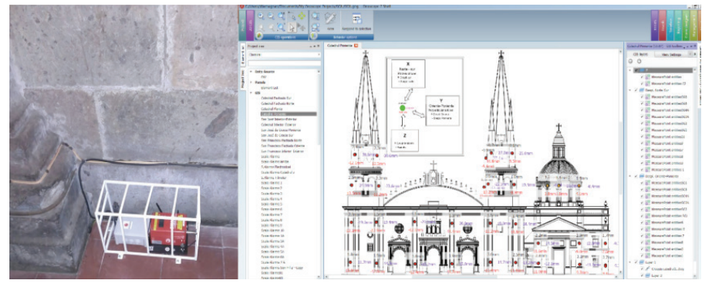


Figura 2. Ejemplo de un geófono instalado en el piso de un edificio catalogado y la plataforma de visualización de los datos de los sensores en tiempo real.

Segundo caso: la ciudadela de Carcasona, Francia. Durante la restauración de dos torres y un muro cortina, se implementó un sistema de monitoreo con teodolitos automáticos, clinómetros y sondas de temperatura. El objetivo era garantizar la seguridad durante las obras y supervisar remotamente el trabajo del contratista, a través de una plataforma de visualización de datos.



Imagen 3. Teodolito automático midiendo 24/7 un muro cortina de la ciudadela de Carcasona, durante los trabajos de restauración.

Nuevas técnicas como el radar satelital InSAR, aplicado al monitoreo histórico de 115 escuelas secundarias en París

Caso satelital: monitoreo y preservación de 115 escuelas secundarias en toda la ciudad de París.

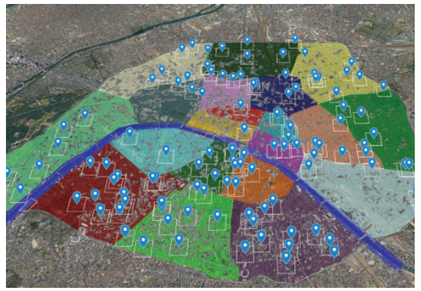


Figura 3. Mapa de las 115 escuelas segundarias de París que fueron monitoreadas por la tecnología InSAR desde un satélite.

Aquí el enfoque es diferente. Se utilizó la tecnología InSAR (Radar Interferométrico de Apertura Sintética), que permite analizar imágenes satelitales para identificar deformaciones estructurales. Esta técnica utiliza las imágenes del pasado para calcular series temporales de una nube de puntos sobre la zona de estudio, utilizando la reflectancia de la superficie. El satélite TerraSAR-X, en órbita desde 2005, ofrece imágenes cada 11 días con una resolución de 3x3 metros y precisión de 2 a 4 milímetros. Entre 2019 y 2023 se analizaron imágenes, generando una nube de puntos para cada escuela. Lo anterior permitió:

1. Identificar movimientos estructurales pasados. Mediante las series temporales de 5 años, se pudieron detectar zonas propensas a movimiento con una precisión muy elevada, del orden de 2 a 5 milímetros.

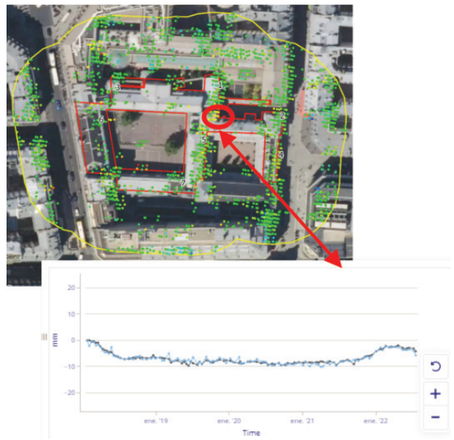


Figura 4. Ejemplo de movimiento detectado sobre la serie temporal de 5 años.

2. Clasificar las escuelas según su nivel de riesgo. En función de las patologías observadas sobre este periodo de 5 años, se clasifican las escuelas según un nivel de riesgo en 3 categorías.

3. Optimizar el mantenimiento preventivo, priorizando los recursos en los edificios más vulnerables. Según la clasificación anterior, se enfocan los recursos y se fomenta el mantenimiento preventivo de estas escuelas secundarias. El satélite no permite monitoreo en tiempo real como se requiere durante la fase de construcción, pero ofrece una gran ventaja: acceso a datos históricos muy precisos que, de otro modo, sería imposible obtener si no se realizaron mediciones en su momento.

Conclusiones

La instrumentación es fundamental en todas las etapas de la preservación del patrimonio histórico y permite:

- Emitir alertas tempranas ante la evolución de patologías.
- Garantizar la seguridad del público.
- Optimizar el mantenimiento mediante análisis satelital.
- Fomentar el mantenimiento preventivo y aumentar la resiliencia estructural.

Muchas gracias por su atención.

*Fotografías/*slides*/gráficas tomadas de presentación compartida para el Encuentro por parte de Damien Tamagnan.

Riesgos geotécnicos y patrimonio cultural en la Ciudad de México

Dr. Gabriel Yves Armand Auvinet Guichard

Muchas gracias por la invitación a este importante Encuentro entre Francia y México. Me referiré a un tema al que he dedicado gran parte de mi vida profesional y que fue una de las razones por las que decidí quedarme en México: los problemas geotécnicos del Valle de México.

Karl Terzaghi, fundador de la mecánica de suelos, decía que la Ciudad de México era el paraíso de esta disciplina. Los que trabajamos aquí en este campo pensamos que es más bien un infierno, pero un infierno fascinante desde el punto de vista técnico.

La Ciudad de México se encuentra en un contexto geológico complejo. Está rodeada por sierras volcánicas: al oriente la Sierra Nevada y la de Río Frío; al poniente la de Las Cruces, al norte la de Guadalupe y, al sur, la Sierra de Chichinautzin, que cerró el drenaje natural del valle y propició la formación del gran lago. En ese lago se estableció la capital del imperio mexica, Tenochtitlan, en un islote conectado a las orillas del lago por calzadas. Los mexicas ya eran excelentes ingenieros geotécnicos; construyeron obras viales e hidráulicas notables, incluyendo el famoso albarradón de Nezahualcóyotl.

Cuando llegaron los españoles, destruyeron, por desconocimiento, gran parte de la infraestructura hidráulica de la ciudad. Alvarado proponía fundar la nueva capital en Coyoacán, pero Cortés decidió mantenerla sobre la isla. Se construyeron diques para contener las inundaciones, pero la ciudad sufrió constantes problemas hidráulicos, como la gran inundación de 1629 que duró más de tres años. Aun así, se decidió que la capital permaneciera en este mismo sitio, debido a las grandes inversiones ya hechas en palacios, conventos, iglesias y otras construcciones.

Gracias a obras faraónicas como el Tajo de Nochistongo y los túneles construidos posteriormente, se pudieron drenar los lagos poco profundos y la ciudad se expandió sobre estos suelos lacustres.

Hoy se cuenta con una base de datos geotécnica de más de 10 mil sondeos que han permitido zonificar el valle en tres áreas principales: zona de lomas (I), zona de transición (II) y zona lacustre franca (III). Los suelos lacustres se caracterizan por su alto contenido de agua, baja resistencia y alta compresibilidad.

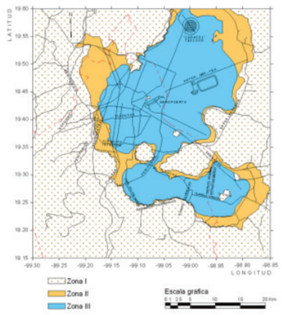


Figura 1. Zonificación geotécnica del Valle de México. Fuente: Laboratorio de Geoinformática del II-UNAM.

A través de técnicas geoestadísticas, se han elaborado perfiles sintéticos del subsuelo, incluso a lo largo de las 12 líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro (Figura 2, Auvinet *et al*., 2017).

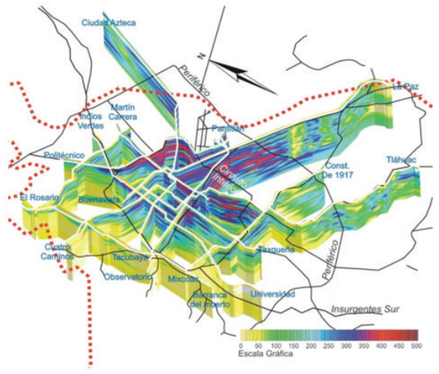
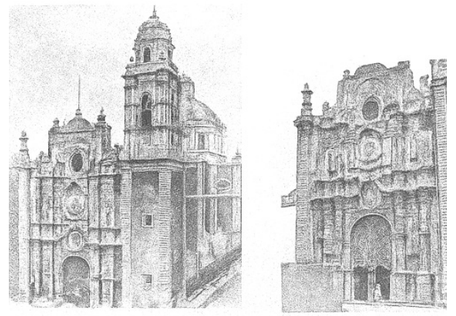


Figura 2. Perfiles del subsuelo (contenido de agua) a lo largo de las líneas del Metro elaborados por técnicas geoestadísticas. Fuente: Laboratorio de Geoinformática del II-UNAM.

Los monumentos históricos de la Ciudad de México se encuentran principalmente en la zona lacustre. Esto implica riesgos geotécnicos importantes para estas valiosas construcciones debido a las características de los suelos, en un ambiente altamente sísmico.

El comportamiento del suelo ha causado problemas desde la época prehispánica. El Templo Mayor, por ejemplo, sufrió asentamientos de hasta 15 metros. Se cree que fue reconstruido varias veces, no sólo por razones religiosas, sino para corregir su geometría.

Ejemplos similares se observan en iglesias de la época novohispana como la de la Santísima Trinidad (Figura 3) que, en 1910, ya presentaba un fuerte asentamiento, y alrededor de la cual se tuvo que excavar un amplio patio para que pudiera volverse a apreciar su magnífica fachada en su totalidad.



1910 2025

Figura 3. Iglesia de la Santísima Trinidad. Fuente: Laboratorio de Geoinformática del II-UNAM. Nota del editor. Reproducción con IA realizada el 9 de octubre de 2025.

En la misma forma, numerosos edificios históricos como el Palacio del Marqués del Apartado, han sido objeto de trabajos para corregir asentamientos diferenciales. El Palacio de Bellas Artes, de construcción más reciente, ha sido citado en muchos libros de mecánica de suelos en todo el mundo como un caso emblemático de cimentaciones con grandes asentamientos.

Además, la ciudad sufre una subsidencia regional por el bombeo excesivo de agua de los acuíferos, lo que agrava el problema de los asentamientos. Esta subsidencia fue identificada desde principios del siglo XX por Roberto Gayol y explicada por Nabor Carrillo en 1948. Hoy el fenómeno se monitorea mediante nivelaciones topográficas, tecnología LiDAR, interferometría InSAR (Figura 4) y estaciones GNSS, que permiten observar desplazamientos tanto verticales como horizontales. Algunas zonas de la ciudad han presentado un hundimiento total de más de 15 metros con respecto a los niveles de 1862 y se siguen hundiendo a un ritmo de varias decenas de centímetros al año. Esta subsidencia se presenta en forma no uniforme, lo que propicia las inundaciones locales.

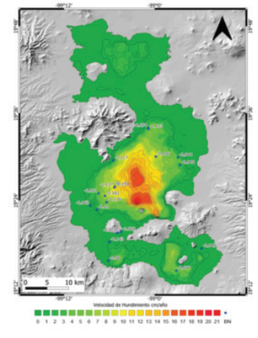


Figura 4. Tasa de subsidencia regional (cm/año) (Técnica InSAR). Fuente: Laboratorio de Geoinformática del II-UNAM).

Otro desafío importante lo constituyen las anomalías geotécnicas naturales o antrópicas presentes en la zona lacustre: abanicos aluviales, tlateles (islotes artificiales prehis-

pánicos), chinampas (cultivos en islas artificiales) y calzadas antiguas, entre otros. Estas irregularidades afectan la respuesta mecánica del suelo y pueden comprometer la estabilidad de los monumentos históricos y otras construcciones desplantadas en ellas.

Los ingenieros mexicanos han desarrollado soluciones creativas para enfrentar estos problemas geotécnicos: cimentaciones flotantes, profundas o compensadas, pilotes de fricción y sistemas innovadores como los pilotes de control o entrelazados. Algunos de estos sistemas han llamado la atención internacionalmente y han sido aplicados en otros países como en el caso de Estocolmo, Suecia, que padece de problemas análogos.

Estos sistemas de cimentación han sido instrumentados para entender mejor su comportamiento, tanto en condiciones estáticas como sísmicas. Se han desarrollado modelos analíticos y numéricos avanzados para simular su desempeño.

Cuando resulta necesario, se tienen que realizar obras de renivelación y recimentación de las construcciones afectadas. Un caso notable fue el de la corrección geométrica de la Catedral Metropolitana, que se enderezó un metro mediante subexcavación (extracción de suelo) e inyecciones compensatorias a fines del siglo pasado. Otros edificios, como el exconvento de Capuchinas y el Palacio Nacional, también han sido sometidos a reestructuración y recimentación por problemas en el subsuelo.

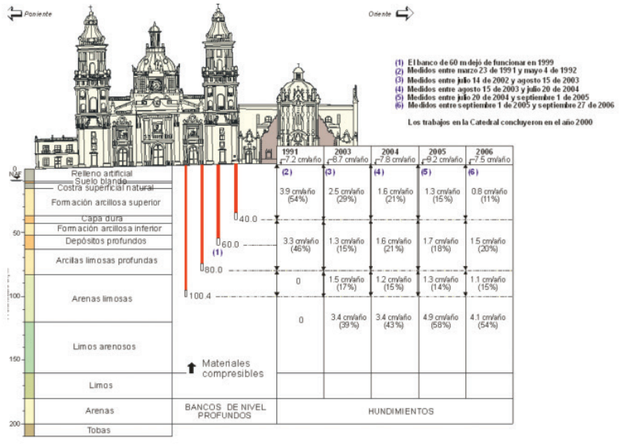


Figura 5. Instrumentación para la corrección geométrica de la Catedral Metropolitana. Fuente: Santoyo y Ovando, 2008.

Los restos arqueológicos pueden afectar edificios modernos, como en el caso de la torre de Tlatelolco (ex Secretaría de Relaciones Exteriores), que presenta una inclinación significativa por interferencia con el sitio arqueológico vecino.

También se han presentado grietas importantes en el suelo en zonas como Iztapalapa, Tláhuac y Xochimilco, causadas por hundimientos diferenciales asociados a la subsidencia regional. En los últimos años, se han construido más de mil 500 cajas de disipación de deformaciones (Figura 6) como medidas de mitigación de daños por agrietamiento en vialidades y viviendas en amplias zonas del suroriente de la ciudad.

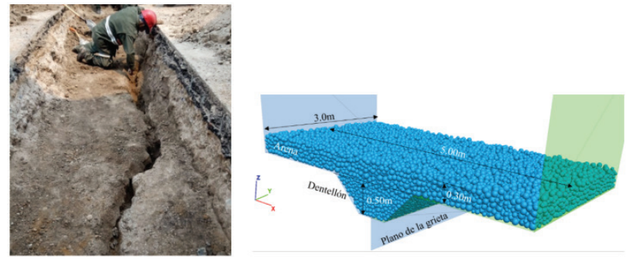


Figura 6. Grieta en el subsuelo y caja disipadora de deformaciones. Fuente: Laboratorio de Geoinformática del II-UNAM.

La ciudad enfrenta también importantes riesgos locales de colapsos por cavernas naturales y artificiales, y problemas de inestabilidad de laderas, sobre todo en la zona de lomas.

En conclusión, los problemas geotécnicos de la Ciudad de México son extensos y complejos. Afectan al patrimonio cultural, pero también a la infraestructura moderna. El futuro de esta gran metrópoli presenta por tanto grandes incertidumbres. Los asentamientos del subsuelo por consolidación que se han presentado podrían duplicarse en el futuro y el secado de las arcillas podría generar muchos metros adicionales de hundimiento. Afortunadamente, el conocimiento acumulado y los avances técnicos logrados han permitido concebir y diseñar diversas soluciones innovadoras que deberán seguirse desarrollando e implementarse en el futuro.

Muchas gracias.

Fuentes de información

Auvinet, G., Méndez, E., y Juárez, M. (2017). *El Subsuelo de la Ciudad de México / The subsoil of Mexico City*, Vol. 3 . Ciudad de México: Instituto de Ingeniería, UNAM. ISBN 3978-607-02-8198-3.

Santoyo Villa, E., y Ovando Shelley, E. (2008). *Catedral y Sagrario de la Ciudad de México*. Ciudad de México: TCG.

Mesa 2
Intervenciones de restauración: entre la tradición y la innovación







Moderadora: **Mtra. en Arq. Valeria Valero Pié**
Coordinadora Nacional de Monumentos Históricos del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH)

Secretaria: **Mtra. Mariana López Mendoza**
Subdirectora de Supervisión de Proyectos y Obras Externas de la Coordinadora Nacional de Monumentos Históricos (CNMH) del INAH

Para mayor detalle escanea el código QR y podrás ver la transmisión completa de esta sección del Encuentro México y Francia

Crédito: CICM-imagen en evento. Esta página





Innovaciones y evolución de las técnicas de limpieza
Dr. Luc Ellermann
Miembro experto del Consejo Internacional de Monumentos y Sitios





Tradición e innovación en los trabajos de intervención de la cúpula central del Santuario de Nuestra Señora de Los Ángeles en la Ciudad de México
Mtro. en Arq. Antonio Mondragón Lugo
Director de Apoyo Técnico de la CNMH-INAH
Dr. Agustín Hernández Hernández
Investigador del Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje de la Facultad de Arquitectura de la UNAM



Capilla de María Candelaria o Santiago Apóstol, Nepopualco: Intervención técnico-constructiva tras el sismo de 2017
Arq. David Pineda Muñoz
Taller de Arquitectura y Restauración, SA de CV







Alternativas técnico-constructivas en la intervención de inmuebles históricos: experiencias en Morelos y Guerrero
Ing. Carlos Arce León
Jefe del Departamento de Análisis de Riesgos Naturales y Antropogénicos en la FES Acatlán
Ing. Hugo Hernández Barrios
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Arq. David Pineda Muñoz
Taller de Arquitectura y Restauración, SA de CV





El aislamiento sísmico en estructuras de mampostería para la conservación del patrimonio
Ing. Stefano Barone
Expuesto por **Ing. Sergio Aguilar Sanders**
Director comercial de Freyssinet de México, SA de CV / Tierra Armada, SA de CV

Nota: Imágenes con enlace Web fueron transmitidas por INAH TV durante el evento realizado en el Auditorio Jaime Torres Bodet (Museo Nacional de Antropología).

Crédito: CICM-imagen en evento. Esta página
Excepto retratos oficiales de ponentes.

A lo largo del último siglo, la restauración de bienes culturales ha evolucionado significativamente, consolidándose como una disciplina compleja que integra saberes técnicos, científicos y humanísticos. Esta maduración no ha dado lugar a una única metodología universalmente aceptada; por el contrario, ha sido terreno fértil para la confrontación de enfoques diversos, a veces incluso opuestos. Esta pluralidad ha enriquecido el campo, permitiendo que se formulen estrategias de intervención más sensibles, adaptadas a las necesidades específicas de cada obra y contexto.

Pese a la diversidad de criterios, la comunidad profesional comparte ciertos principios fundamentales. Uno de ellos es el respeto a la integridad del patrimonio cultural, tanto en su dimensión material como simbólica. Otro, es la necesidad de adoptar un enfoque metodológico riguroso, que se apoye en la colaboración interdisciplinaria. Además, se reconoce como indispensable la compatibilidad entre materiales originales y aquellos incorporados durante las intervenciones de restauración, para garantizar la estabilidad y reversibilidad del tratamiento.

En este escenario, la tradición y la innovación no son fuerzas opuestas, sino dimensiones complementarias. La revalorización e implementación de técnicas artesanales y materiales históricos ha permitido recuperar saberes olvidados, mantener la autenticidad de las obras intervenidas e, inclusive, restablecer el equilibrio estructural perdido. Al mismo tiempo, la introducción de tecnologías contemporáneas —como análisis no invasivos, modelados tridimensionales o nuevos materiales compatibles y reversibles— ha abierto nuevas posibilidades de intervención, haciendo frente a desafíos que las técnicas tradicionales no siempre pueden resolver por sí solas.

Las intervenciones más exitosas son aquellas que logran establecer un diálogo equilibrado entre estas dos vertientes. El reto no es elegir entre tradición o innovación, sino comprender cuándo y cómo emplear cada una en función del bien cultural específico, su historia, estado de conservación y contexto de uso. Esta mesa buscó, precisamente, compartir casos ejemplares donde la conjunción de saberes antiguos y tecnologías modernas ha permitido intervenciones respetuosas, sostenibles y técnicamente eficaces, que enriquecen tanto al patrimonio como al campo profesional.

Moderadora: **Mtra. en Arq. Valeria Valero Pié**
Secretaria: **Mtra. Mariana López Mendoza**

Innovaciones y evolución de las técnicas de limpieza

Dr. Luc Ellermann

Mi presentación trata acerca de las técnicas de limpieza de los edificios y su evolución en los últimos años, de cómo se ha abordado la limpieza a lo largo de la historia y de sus mejoras en el ámbito de la conservación del patrimonio cultural.

Para comenzar tenemos una foto del centro de la Ciudad de México en 1910, en la cual podemos ver que todos los monumentos de la imagen se ven sucios, ello debido a la contaminación atmosférica que se produjo a gran escala con el desarrollo industrial en todo el mundo. El mismo caso se dio en París.





Imágenes 1 y 2. Vista del centro de la Ciudad de México en 1910 y de Palenque. Nota del editor. Reproducción con IA realizada el 9 de octubre de 2025.

Actualmente encontramos un nuevo problema en Francia en todos los medios urbanos, ocasionado por el uso de la gasolina con plomo durante años. Este metal pesado y tóxico sigue presente en las costras y depósitos negros de las fachadas de los inmuebles históricos. Un aspecto importante que debemos tomar en cuenta para proteger a la población en las inmediaciones del edificio que se restaura, por el riesgo de contaminación con plomo. El problema es la reacción que ocurre al combinarse la piedra caliza con la lluvia ácida, que contiene azufre, nitrógeno y cloro, porque produce las famosas costras negras que contienen yeso, es decir sulfato de calcio. Además de la contaminación atmosférica, en los monumentos también se registra la contaminación biológica (fotografía de Palenque). Otro problema es el relacionado con las sales marinas, como sucede en la zona arqueológica de Tulum. Cuando hablamos de la limpieza nos referimos sólo a los monumentos, pero son técnicas aplicables también a las piezas de los museos. Estos métodos son irreversibles, lo que va contra la Carta Internacional para la Conservación y Restauración de Monumentos y Sitios, más conocida como la Carta de Venecia, que

establece los principios y directrices internacionales para la conservación y restauración de monumentos históricos, cuyo objetivo principal es proteger el patrimonio cultural. Para determinar la técnica de limpieza más adecuada para cada monumento es necesario realizar un estudio preliminar minucioso, lo que no se da en todos los casos, como el que se muestra en la imagen en el que se realizó una intervención del lado izquierdo que produjo una pérdida importante de materia. En ciertos casos las técnicas de limpieza se llevan al límite de su capacidad, provocando daños irreparables. Desafortunadamente un estudio previo no fue suficiente, por lo cual la intervención humana debe ser controlada desde el inicio de los trabajos y no sólo en la preparación de la restauración.



Imagen 3. Vista de intervención humana en restauración.

Un segundo tema relacionado con la limpieza implica responder las siguientes preguntas: ¿Qué significa hacer una limpieza? ¿Cuál es la diferencia entre limpio y limpiado? ¿La limpieza debe dejar un monumento limpio o solamente suprimir los contaminantes que podrían crear patologías ulteriores intrínsecas a la piedra? Son preguntas que deben hacerse.

Se presentan aquí unos ensayos realizados en el Museo del Louvre en París hace 15 años. Se ensayaron ocho técnicas diferentes de limpieza, todas realizadas respetando el soporte y que dieron igual número de resultados estéticos. Es decir que cuando se prepara una operación de limpieza se tiene que efectuar un seguimiento estricto que determine cuándo se suprimen las diferentes capas que se pueden encontrar en el soporte.



Imagen 4. Ensayos realizados en el Museo del Louvre.



Imagen 5. Vista de impactos de una limpieza no controlada.

Esta imagen de 2024 muestra los impactos de una limpieza no controlada, realizada con sosa cáustica en un monumento parisino. Después de la limpieza se aplicó un consolidante de sílice, las dos operaciones provocaron una cristalización de sales a partir del sodio de la sosa, que es fuertemente nocivo en presencia de sulfatos. Lamentablemente, los daños se verán a largo plazo. Éste es un ejemplo de la aparición de daños provocados por una operación de limpieza realizada hace 15 años.

De ahí la importancia vital de seleccionar una técnica y, especialmente, de hacer pruebas antes de una limpieza para contar con un diagnóstico de la naturaleza del contaminante que se va a retirar del monumento, su estado sanitario, el estado de conservación, así como el contexto ambiental y social.

Cabe destacar que en Francia, en 1967, se creó el Laboratorio de Investigación de los Monumentos Históricos (LRMH, Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques) convirtiéndose en el "guardián del templo" de las diferentes técnicas de restauración, responsable de realizar el seguimiento y la eliminación de técnicas peligrosas para el soporte. Cabe señalar que no existe un método universal, es decir que todos los métodos de limpieza podrían ser buenos o malos, dependiendo del diagnóstico realizado y de las personas que lo hicieron.

Por ejemplo, en la restauración de pinturas el principal utensilio es el bisturí, que puede ser muy peligroso o extremadamente útil en función del uso que se le dé, lo mismo sucede con los métodos de limpieza. Algunas técnicas de limpieza han evolucionado desde la utilización de ácidos agresivos, que ha sido abandonada, o la química "pesada", como el uso de la sosa o del ácido clorhídrico. En la actualidad se ha pasado a una producción delicada de ácidos usados en los museos para la limpieza de estatuas y también de fachadas.

Existe un nivel diferente de limpieza en el cual se utilizan productos que son más suaves, no abrasivos, es decir que ya no usan ácidos o bases fuertes pero que todavía pueden tener un impacto en los monumentos. Incluso en esas condiciones se produce un impacto en los monumentos, por lo que se ha pasado a una química todavía más suave y se tiende a limpiar sin utilizar principios activos.

Ahora hablaremos de la contaminación biológica, de cuáles serían las últimas innovaciones en lo referente a la contaminación biológica que antes se limpiaba con cloro (lejía), lo que está proscrito actualmente. Hoy en día se utilizan varios productos con una base de amonio cuaternario, que recientemente se ha reemplazado por aceites esenciales. En la Catedral de Estrasburgo se aplicó un método de limpieza con algunas

fórmulas de aceites esenciales y algunos biocidas clásicos del mercado. Se pudo observar que la eficacia de la aplicación fue idéntica y la remanencia fue buena y, lo más importante, el impacto toxicológico fue mucho menor.

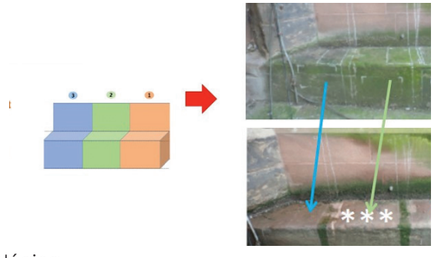


Imagen 6. Contaminación biológica.

En la figura siguiente se ven placas de Petri con marcadores utilizados para determinar la toxicología de los medios acuáticos. En presencia de biocidas clásicos, los "lentidos" se vuelven blancos y mueren; al contrario, en presencia de aceites esenciales el "lentido" se comporta como el testigo (sin sustancias añadidas). Estos procedimientos han sido utilizados en el Palacio de los Papas de Avignon, edificio donde los aceites esenciales se aplicaron con un pulverizador y posteriormente se aclaró con vapor de agua no saturada a baja presión.

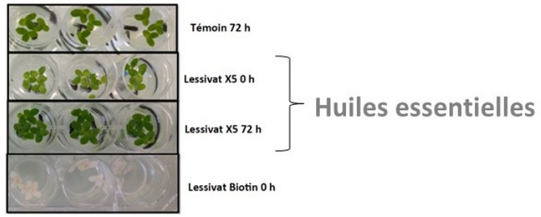


Imagen 7. Vista placas de Petri con marcadores utilizados para determinar la toxicología de los medios acuáticos.

Pasamos ahora a las innovaciones para tratar las costras negras. Como hemos visto antes, las costras negras están compuestas de yeso, o sulfato de calcio deshidratado. Para el proceso teníamos dos soluciones de limpieza: una, disolviendo la costra en una solución; y dos, utilizando el principio activo que permite romper este vínculo entre el calcio y el sulfato, seguido de un procedimiento de enjuague. Éstos son los métodos que funcionaban relativamente bien; desafortunadamente, a la operación del enjuague, la más crítica, no se le da la importancia que merece. El enjuague no sirve para limpiar las últimas partes de la costra que quedan en la fachada, sólo garantiza la eliminación de residuos que pudieran generar patologías internas en la misma. Sin embargo, esto contribuyó al desarrollo de diferentes productos a base de gel, de compresas o de materiales sintéticos, así como mezclas entre arcillas y materiales acrílicos para mantener una humedad importante en el soporte y evitar la movilización de las sales. Una de las técnicas utilizadas para la limpieza en las décadas de los ochenta y noventa era básicamente el agua, pero se tenía que usar durante varios días. Esta técnica moviliza las sales, perturba la piedra y crea patologías complementarias.



Imagen 8. Vista de aplicación de sulfato de calcio.

Aun cuando el agua es un buen método de limpieza, tiene otro problema: un litro sólo puede disolver 2.5 gramos de sulfato de calcio de las costras. En tanto que las compresas permiten retener el agua en la parte superficial de los materiales y mediante aditivos se puede aumentar la capilaridad de la compresa, la cual podrá mantenerse en la superficie durante mucho tiempo sin permitir el paso del agua al soporte.

Éstos son los resultados de una fachada parisina de piedra calcárea con un ennegrecimiento normal o importante. Se realizaron varios ensayos para comparar métodos de limpieza realizados con productos a base de látex y con compresas, con y sin principio activo. Cuando se usa sólo agua obtenemos una limpieza que puede ser muy interesante en términos estéticos, como en esta fachada. Los resultados muestran que la limpieza fue demasiado lejos, dejando la piedra sin su pátina, lo que es contrario a las diferentes técnicas de restauración.

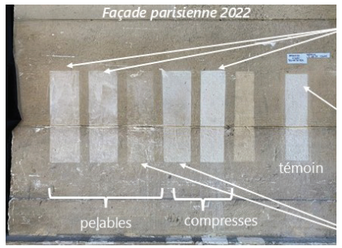


Imagen 9. Ensayos para comparar métodos de limpieza realizados con productos a base de látex y con compresas.

Los métodos de aplicación son los clásicos, los cuales se pueden hacer de manera manual o mecánica en la obra. Después de que las compresas se secan, se separan del soporte, o monumento, dejándolo limpio; a veces se aplica aire comprimido para eliminar el resto de los contaminantes.

Para mejorar el lado estético podemos usar procedimientos de lavado posterior mediante la inyección-extracción de agua. Se realiza mediante un cabezal con dos compartimientos, uno para la inyección de agua a presión muy baja y otro para el aspirado creando un efecto de turbulencia sobre el soporte, limpiándolo o enjuagándolo.

Con respecto a las nuevas técnicas, la más reciente es la que utiliza el láser, la cual usan en los museos para limpiar las estatuas y los textiles. De igual manera, se ha aplicado en algunos frescos y ha funcionado muy bien. La aplicación en grandes superficies

podría ser un problema pero en la actualidad, con las nuevas tecnologías, esta técnica puede tener un alto rendimiento, además es la única que puede usarse con una total integración estética. Como se ve en las imágenes, el objetivo no era limpiar completamente la fachada, se puede observar que de un lado está más clara y en el otro se observa un nivel de suciedad ligero. Para limpiar este tipo de monumentos se utilizan técnicas complementarias que cubren la totalidad de la fachada, como el láser, que permiten adaptar la intensidad en función del estado del sustrato. En la siguiente imagen se puede observar su desempeño, se trata de un trabajo realizado el año pasado en París, en el cual con cierta rapidez se eliminó la costra negra de suciedad. El método se aplicó sobre una piedra extremadamente frágil y cuando el láser pasa en estas manchas negras que contienen polvo de piedra, éste permanece.



Imagen 10. Vista de limpieza con láser.

La limpieza con láser tiene un gran rendimiento porque se pueden limpiar grandes superficies con diferentes tipos de material en poco tiempo.

Actualmente existen nuevos láseres con un rendimiento importante, como el de la figura que tiene una distancia del haz de luz de 17 centímetros. En este caso se han realizado ensayos sobre costras negras en el Palacio de Chayot, donde se constató su eficacia contra las costras negras relativamente duras, con una rapidez importante. Además, hay que destacar su selectividad: este método puede aplicarse de forma inocua sobre la toba francesa, una piedra porosa extremadamente frágil, como se ve en la figura, donde el láser ha quitado las pequeñas "ampollas" dejando el polvo de piedra que se encuentra debajo y una telaraña.

Para concluir me gustaría insistir en que no existen ni buenas ni malas técnicas de limpieza, sino que la prioridad es realizar un estudio minucioso para determinar cuál es la mejor técnica para aplicar al inmueble o mueble a restaurar.

Muchas gracias.

*Fotografías/*slides*/gráficas tomadas de presentación compartida para el Encuentro por parte de Luc Ellermann.

Tradición e innovación en los trabajos de intervención de la cúpula central del Santuario de Nuestra Señora de Los Ángeles en la Ciudad de México

Mtro. en Arq. Antonio Mondragón Lugo
Dr. Agustín Hernández Hernández

El Santuario Parroquial de Nuestra Señora de los Ángeles es el inmueble que registró los mayores daños por el sismo de septiembre de 2017 en la Ciudad de México, lo que ha significado un reto y un compromiso mayor para quienes hemos participado en la recuperación del edificio.



Imagen 1. Vista oriente de la cúpula después del colapso parcial provocado por el sismo de 2017. Fotografía de Antonio Mondragón Lugo, CNMH. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/4jC5mv3HE5Y?si=udBEjx0VlFwjl5ss&t=8120*

En los últimos seis años se han realizado diferentes trabajos; no obstante, esta exposición se enfoca principalmente en la intervención de la cúpula central.

Para situarnos en el espacio y en el tiempo, cabe recordar que el santuario fue un conjunto religioso de grandes dimensiones, ocupó dos manzanas de la actual traza urbana de la colonia Guerrero, la cual también ha tenido una evolución arquitectónica bastante densa. La parroquia se construyó en el siglo XVI como una pequeña capilla dedicada a la imagen de la virgen María, que fue creciendo gracias a la devoción y el enorme esfuerzo de la feligresía. Reconstruida en distintos momentos debido a las inundaciones recurrentes, fue en los primeros años del siglo XIX cuando se logró la configuración de una muy buena parte de este gran conjunto, que tuvo un panteón importante y un colegio para niñas indígenas, pero no contaba con la cúpula del transepto, como se observa en los documentos gráficos de la época.

El santuario se edificó cerca del centro de la ciudad, hacia el poniente de la zona arqueológica de Tlatelolco, justo el borde entre el área lacustre y la parte que se fue rellenando para el crecimiento urbano, primero en el periodo prehispánico y después en el virreinal. Hecho que permite comprender la problemática que ha presentado el lugar a lo largo de su historia, debido a la baja resistencia del suelo en el que fue levantado el templo.

A finales del siglo XIX, la comunidad obtuvo los recursos necesarios para construir la cúpula central, que por sus dimensiones es la tercera más grande que se logró construir en la Ciudad de México con un sistema constructivo de mampostería, después de las bóvedas de los templos de Nuestra Señora de Loreto y de Santa Teresa la Antigua, y semejante en cuanto al claro con el crucero de la Catedral Metropolitana.

El arquitecto Emilio Dondé Preciat fue quien la diseñó y construyó, de acuerdo con sus propias palabras, la concepción formal hace alusión a una corona para la virgen, lo que tiene un valor en sí mismo y un importante significado.

Cinco días después de ocurrido el sismo de 2017, colapsó el 40 por ciento de la cúpula quedando en pie una sección del tambor y el casquete, lo cual representó, desde ese momento, un gran desafío para su preservación, evitando ulteriores colapsos que pusieran en riesgo al propio inmueble y sus bienes muebles asociados, además de los edificios colindantes: departamentos de interés social en el lado norte y dos escuelas públicas en el lado sur.

En un inicio, al enfrentar el problema se identificó como prioridad deducir las hipótesis del mecanismo de colapso, por lo que se analizó y se recurrió a la técnica del método de análisis límite.

A partir de esto, también se dedujeron las causas, una pudo ser la gran deformación del suelo, ya que en el arranque de un punto a otro era de 20 centímetros. Otro factor fue el peso de la linternilla, superior a 27 toneladas, considerado muy importante por estar concentrado en la parte central para la poca flecha que tiene la cúpula. Sabemos que en una cúpula, a mayor flecha, mayor estabilidad.

Para el diseño de la estructura de estabilización y protección, se plantearon varias hipótesis para determinar qué hacer. Para ello, se analizó primero el peso de la cúpula de 521 toneladas; sabíamos que si se trataba de mantener en el espacio este peso, se requeriría de un apuntalamiento bastante invasivo y de gran costo.

Por tanto, se continuó con el análisis descubriéndose que la cúpula se diseñó mediante la técnica denominada "resistencia por forma", es decir que la geometría tiene mucha importancia. A partir de este dato, se hicieron otros estudios. Por ejemplo, lo convencional era diseñar estructuras planas que al resultar un momento de 18 toneladas por metro, se podían asociar a la cantidad de material; y cuando se le dio forma, disminuyó a la décima parte. Esto significó que con la geometría se consiguió racionalizar esfuerzos. En consecuencia, si con esa metodología se diseñó la cúpula, también podía servir para diseñar el apuntalamiento resistente por forma.

Siempre le digo a los alumnos que primero deben poner atención a las gráficas, esos croquis expresivos, después se verán los números, las fórmulas, hasta lograr, con las matemáticas, encontrar la creatividad; cuando se tiene una teoría clara y completa, se pueden generar "n" soluciones y no recetas.

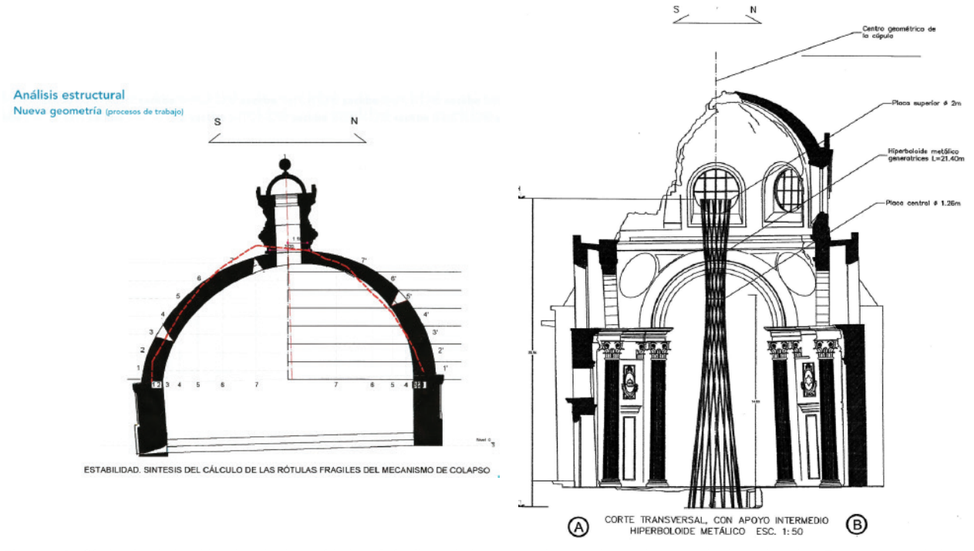


Figura 1. Síntesis del cálculo de las rótulas frágiles del mecanismo de colapso de la cúpula. Esquema elaborado por Agustín Hernández Hernández.
Figura 2. Corte transversal con apoyo intermedio hiperboloide. Plano elaborado por Sackbé, SA de CV-CNMH, 2019.

El diseño consistió en un hiperboloide de doble curvatura inversa, de 21 metros de altura y con una capacidad de 77 toneladas. Se pensó como el primer elemento que debía colocarse y el último a retirar cuando se desmontara el apuntalamiento. Una solución poco invasiva al interior. Dos triditrabes de aproximadamente 25 metros de longitud que atravesaran el transepto, transmitiendo la carga vertical a los muros y descansando en las enjutas, apoyándose básicamente en los muros.

Las triditrabes eran las que permitían recibir todo el peso del casquete.

Las maniobras para el montaje se realizaron con una grúa. Fue una gran experiencia, porque se calcula la geometría, las cargas, todo, cada tornillo, pero no se calcula el éxito de la maniobra. Esto, porque los movimientos se hicieron a una distancia de 70 metros de la grúa y a 35 metros de altura, por lo que alguna ráfaga de viento o algún otro factor, pudo afectar los trabajos.

Las triditrabes tenían que atravesar las lucarnas, representando un gran reto a una altura de 25 metros.

Asimismo, las generatrices deben tener una especificación precisa porque cada una es una afirmación, es matemática geométrica.

El diseño también incluyó una plataforma de trabajo sobre las triditrabes.

La cúpula tiene una estereotomía especial, llamada escarzana, ya que en la zona de la clave tiene menor espesor que en la del arranque; es un diseño muy ingenioso que proporciona mayor estabilidad, porque el arranque funciona como contrarresto y equilibra los empujes que vienen de la clave, como vectores de manera divergente.

Este elemento central denominado cubo, es la cubierta para poder trabajar en seco cuando se hagan las intervenciones y evitar retrasos de obra.



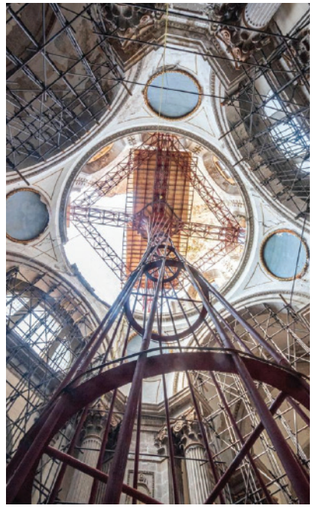


Imagen 2. Vista sur de la cúpula. Proceso de construcción de estructura metálica de estabilización y protección de la cúpula. Fotografía de Antonio Mondragón Lugo, CNMH. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/4jC5mv3HE5Y?si=xxL1Zl67RUMjbKqD&t=8587*

Imagen 3. Vista interior de la estructura metálica de estabilización y protección de la cúpula. Fotografía de Antonio Mondragón Lugo, CNMH. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/4jC5mv3HE5Y?si=8i83qlPqxfTId1iz&t=8656*

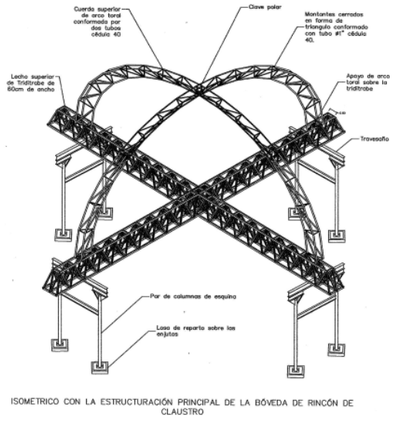


Figura 3. Isométrico de la estructura principal (triditrabes) de estabilización y de la bóveda de rincón de claustro (cubierta). Plano elaborado por Sackbé, SA de CV-CNMH, 2019.

Respecto de la sobrecubierta, se diseñó con el rigor de la geometría; se respetaron las proporciones del monumento, dirigiendo el peso hacia los muros, a partir de una solución denominada en arquitectura como bóveda de rincón de claustro que, en este caso, fue metálica.

Las generatrices de los arcos torales de la bóveda se soportan en los extremos, donde las triditrabes están simplemente apoyadas para impedir transmitir momentos a los muros.

La expresión final de la bóveda tiene unas marquesinas perimetrales que permiten iluminar y ventilar, pensando en los trabajos a futuro.

Aparentemente es una cúpula octagonal, sin embargo la estructura tiene una estabilidad muy ingeniosa porque se apoya en ocho contrafuertes; las lucarnas, como las denominamos, funcionan como arcos de descarga, reciben la carga desde la clave, y al llegar a las lucarnas, que son como lunetos de poca penetración, conducen la carga hacia los ocho contrafuertes del sistema de contrarresto, que es muy ingenioso y arquitectónico.

La reconstrucción de las lucarnas se basó en el estudio de la estereotomía de los elementos existentes.

El trabajo que se llevó a cabo fue de acuerdo con la técnica tradicional. La hipótesis fue: la cúpula se ha mantenido más de 150 años; al aplicar esta tecnología, se apuesta a que la cúpula dure otro periodo igual, respetando sus valores, para llegar a la originalidad de su solución.

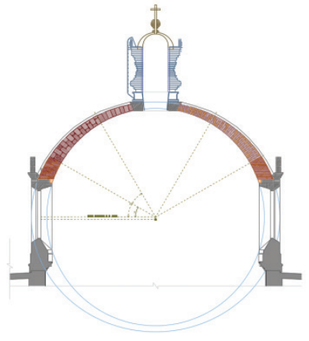


Figura 4. Trazo geométrico de la cúpula. Corte esquemático. Plano elaborado por Antonio Mondragón Lugo, CNMH.

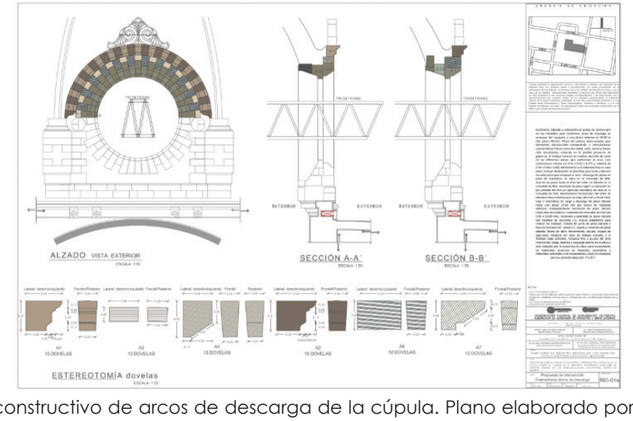


Figura 5. Sistema constructivo de arcos de descarga de la cúpula. Plano elaborado por Diana Hernández, CNMH.

La estructura auxiliar de acero ha sido fundamental para la permanencia de esta cúpula; la fabricación y el montaje del sistema de apuntalamiento se hizo en 2020, y permitió dar estabilidad al transepto, así como seguridad para el desarrollo de las obras y los estudios técnicos, como la revisión de la cimentación y la consolidación en muros, arcos y pechinas, trabajos que no hubiera sido posible realizarlos sin esta gran estructura.





Imagen 4. Recuperación de piezas de cantera de la sección colapsada de la cúpula para la construcción del altar. Fotografía de Antonio Mondragón Lugo, CNMH. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/4jC5mv3HE5Y?si=pLUIPT3pk4-wbJ-jO&t=9413*

Imagen 5. Proceso de reconstrucción de los arcos de descarga y cúpula. Fotografía de Antonio Mondragón Lugo, CNMH. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/4jC5mv3HE5Y?si=jLrwMU12plFenWNV&t=9369*

Actualmente se interviene la cúpula, lo que ha permitido un análisis mucho más detallado del sistema constructivo de la fábrica. Así, encontramos que el casquete está forjado por hiladas de tabique de barro cocido y sillares de tezontle de dos tipos, que varían en cuanto a su densidad y peso. En la parte inferior se utilizó la piedra volcánica más densa, menos porosa; en tanto que en la parte superior, hay un cambio claramente definido en el que se usó un tezontle más ligero.

Como ya se comentó, la linternilla original, que era el remate de la corona, cayó al interior de la nave. Era muy robusta y masiva por estar construida en cantería, por lo que a partir del análisis realizado por el doctor Agustín Hernández, se concluyó que el peso debía bajar considerablemente. Se realizaron varios ejercicios de restitución de este cuerpo con distintos materiales pétreos, sin lograr disminuir sustancialmente el peso, por lo que se tomó la decisión de cambiar el material por placas de acero para construir una nueva linternilla, respetando totalmente la solución formal y volumétrica de origen.

En términos conceptuales, al volumen inicial se le sustrajo una serie de capas horizontales para generar un vacío entre éstas. La sobreposición y repetición de los bordes de las placas permiten que el ojo del espectador desde el nivel de calle, perciba el volumen tal como fue antes del colapso. Además, el espacio entre las placas permite la disipación del aire caliente del interior de la nave. Para la fabricación de más de 500 piezas de acero, se utilizó una máquina de corte láser por computadora.

La restitución del tambor se realizó con el sistema constructivo de cantería y tabique.

En la base de este elemento se encontró un zuncho de madera con uno de los lados bastante dañado, por lo que se sustituyó con una viga de recuperación de otro inmueble, es decir, con madera estable y resistente.

Se hizo también el trabajo de consolidación del casquete, reemplazando sillares de tezontle que estaban fracturados, así como la reconstrucción de las secciones sur y suroriente del tambor que colapsó.

Cabe destacar que hay una línea que se traza entre la tradición, que se nutre de las aportaciones del pasado, y la innovación mediante el uso de tecnología actual. Encontramos un camino intermedio que pasa por el uso de *software* para modelar cada uno de estos elementos en tres dimensiones, los cuales se traducen en plantillas de cartón con dibujos en su verdadera forma y magnitud, gracias al trabajo y la habilidad de los maestros canteros; además del labrado de cada una de las piezas y su colocación a aproximadamente 30 metros de altura. Es importante reconocer siempre, el trabajo humano y la riqueza de los oficios que guardan un conocimiento ancestral.

De manera simultánea, se restituyeron los arcos que forman cada uno de los tres grandes óculos, que se van entretejiendo y ligando con las nervaduras de cantería, y con la plementería de tezontle y tabique. Actualmente estamos utilizando más tabique que tezontle, por la dificultad de contar con los suministros necesarios de tezontle ligero. Se hacen los trazos geométricos en gabinete y en campo se realiza el trazo de las directrices y generatrices, así como la posición de referencias espaciales de forma manual, con varillas que van tomando la curvatura que les corresponde.

El doctor Agustín Hernández nos ha ayudado a obtener los trazos, lo cual ha sido complejo debido a la distorsión geométrica que presenta esta parte del edificio.

El material producto del colapso de la cúpula y que no fue posible reutilizar en elementos estructurales porque se dañó con el impacto de la caída, no se desechó por su valor documental y simbólico. Por el contrario, con él se está construyendo un nuevo altar, ya que el espacio del presbiterio no lo tenía. De esta manera, este material permanece en el inmueble y adquiere un nuevo significado.

Gracias a la participación de un buen equipo de profesionistas, de personas de la comunidad que han estado siempre atentas a los avances, así como del padre Adrián y especialmente de los trabajadores, los maestros albañiles, canteros y herreros, ha sido posible la recuperación de este monumento.

Capilla de María Candelaria o Santiago Apóstol, Nepopualco: Intervención técnico-constructiva tras el sismo de 2017

Arq. David Pineda Muñoz

Introducción

La capilla de María Candelaria o Santiago Apóstol, ubicada en la localidad de Nepopualco, municipio de Totolapan, en el estado de Morelos, es un inmueble de valor histórico que data del siglo XVI, con diversas etapas constructivas a lo largo del tiempo. Se encuentra sobre una loma colindante con la plaza principal, donde se ubica la ayudantía municipal, y se desplanta sobre una plataforma de 6 mil 663 metros cuadrados de área.

El inmueble sufrió graves daños estructurales a consecuencia del sismo ocurrido el 19 de septiembre de 2017, lo que motivó una intervención integral basada en criterios técnicos, estructurales, patrimoniales y comunitarios. El caso de la capilla de María Candelaria o Santiago Apóstol, en Nepopualco, es un ejemplo del uso de la madera laminada en la intervención del inmueble histórico, lo que no es algo común en los procedimientos de restauración, pero representa el valor o la aportación en esta mesa.



Imagen 1. Vista general de la capilla de María Candelaria antes del sismo del 19 de septiembre de 2017. Se observa la capilla abierta y la fachada principal. Crédito: Fototeca Nacional del INAH SINAFO. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/4jC5mv3HE5Y?si=eUu2p_uS4ruAzWfW&t=9697*

Contexto histórico y arquitectónico

La capilla de María Candelaria o Santiago Apóstol, ubicada en la localidad de Nepopualco, tiene una orientación oriente-poniente, posee atrio delimitado por una barda de mampostería de piedra con remates de pináculos y con dos arcos de acceso: uno en la zona norte y otro en la zona poniente, el cual puede considerarse el acceso principal, pues es el de mayor envergadura y es el que permite llegar directamente a la entrada principal del templo. El andador procesional que une este arco con el acceso principal, está hecho de concreto y lo flanquean cuatro grandes árboles.

En la zona oriente de la barda atrial puede observarse el vestigio de otro arco de entrada, sin embargo actualmente se encuentra tapiado.

La capilla se localiza en la parte oriente del atrio, el muro testero se fusiona con el paramento de la barda atrial. En la zona norte del templo existía una capilla abierta y una escalera de mampostería que daba acceso a la cubierta.

En la zona sur se ubica el pórtico, que permite el acceso hacia la sacristía, además de una escalera que conecta el pórtico con las cubiertas de los anexos y la sacristía.

Daños estructurales por el sismo de 2017

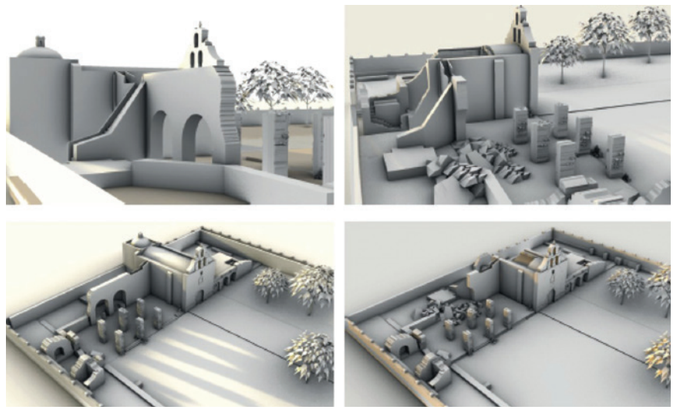


Imagen 2. Comparativa visual del estado del inmueble, antes y después del sismo del 19 de septiembre de 2017. Crédito: Grupo TARES, SA de CV.

El sismo del 19 de septiembre de 2017 provocó daños muy graves en la capilla de María Candelaria o Santiago Apóstol. Antes del terremoto aún se conservaban tres arcos de lo que fuera una capilla abierta, así como una pintura mural que representaba la cultura Chalchihuites, los cuales colapsaron, perdiéndose prácticamente todo ese antiguo testimonio; también se desplomó gran parte de la nave, de los muros laterales y el testero.

La cúpula de la nave se derrumbó en su totalidad, mientras que la bóveda de cañón que cubría este mismo espacio, registró un colapso del 80 por ciento. Obviamente, al fallar estos elementos estructurales y caer sobre la nave, ocasionaron daños sobre el ciprés, el cual prácticamente desapareció, así como el arco fajón ubicado en esta zona. Además, el muro del presbiterio también cayó casi completo. Los muros norte y sur de la nave principal se desplomaron parcialmente y lo que quedó en pie presenta grietas horizontales.

El arco fajón del coro se vio severamente afectado al venirse abajo una sección de la zona sur, dejando la marca de su caída libre en lo quedó del piso del templo. El resto del arco también presentó desplazamiento.

La capilla abierta tuvo un colapso total, así como la escalera ubicada en la zona norte, que daba acceso a la bóveda de la nave principal.

Por otra parte, la sacristía tuvo severas afectaciones, sobre todo en su bóveda, que presentó grietas longitudinales en la parte central y en las zonas laterales. La fachada principal tuvo severos daños: grietas, fisuras y un desprendimiento respecto de la bóveda de la nave. La barda atrial también tuvo un colapso parcial en la zona oriente (colindante con la zona del presbiterio). Mientras que los arcos de acceso (norte y poniente), una gran parte de la bóveda de cañón de la nave, hasta el coro, y el ciprés en el presbiterio, se derrumbaron. Al analizar las secciones de muro en pie, se evidenció que después del sismo la comunidad y protección civil habían desmantelado parte de los muros para evitar algún riesgo adicional.



Imagen 3. Vista interior de los daños estructurales en la nave y el coro, tras el colapso de la bóveda. Crédito: Grupo TARES, SA de CV. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/4jC5mv3HE5Y?si=E6iw3oGyq5lsTt5H&t=9903*

Imagen 4. Vista posterior del templo, desde el atrio. Se aprecia acumulación de escombros tras el colapso. Crédito: Grupo TARES, SA de CV. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/4jC5mv3HE5Y?si=N5l-FKRc5hYIZ4mH&t=9919*

Diagnóstico y análisis estructural

Parte de la metodología de intervención en cualquier inmueble histórico requiere un análisis; esto lo comparo con el diagnóstico médico: cuando un paciente es bien examinado por el doctor, resulta en una buena intervención; una mala valoración puede costarle la vida a la persona. En el caso de los inmuebles de valor histórico patrimonial, se tiene una metodología muy particular para desarrollar las propuestas de intervención, considerando la investigación histórica como un punto fundamental, además del registro del estado actual, de sus materiales y deterioros; ello con la finalidad de entender el edificio, el cual nos habla y nos va diciendo qué le pasó, qué tiene y hacia dónde debemos dirigirnos.

Al día siguiente del sismo se realizó una visita al sitio, en donde se encontró que todas las piedras resultado de los colapsos, fueron agrupadas por parte de la comunidad, identificadas por zonas con unos letreros que decían “piedra de bóveda”, “piedra de muro”, etcétera.

Las piedras eran de cantos rodados, asentadas con una fábrica de arcilla, características que revelaron que los muros no tenían la suficiente capacidad de carga. El análisis

geométrico que se realizó, demostró el empuje significativo de las bóvedas hacia los muros, la línea resultante de ese empuje se dibuja fuera del muro, por lo que aunado a la magnitud del sismo, fueron factores que provocaron el colapso.

Se hizo un registro de los desplomes o de las verticales de los muros, en especial de la fachada con la espadaña, porque el elemento no sufrió daños, se mantuvo estable, a diferencia del resto del inmueble.

Se realizaron modelos o maquetas virtuales del conjunto como herramientas de análisis para el reconocimiento de los perjuicios y entender los mecanismos de fallas, a fin de generar las hipótesis del porqué de la gravedad de los daños.

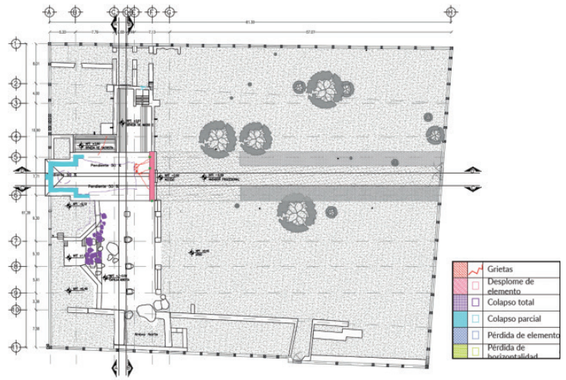


Figura 1. Planta de conjunto con simbología de afectaciones provocadas por el sismo. Crédito: Grupo TARES, SA de CV.

Después de analizar la magnitud de la destrucción sufrida por el inmueble debido al sismo de 2017, se llegó a la conclusión de la necesidad de realizar estudios puntuales para llegar a un diagnóstico integral de las causas del colapso total de varios elementos arquitectónicos, así como de los grandes daños estructurales en los elementos que quedaron en pie.

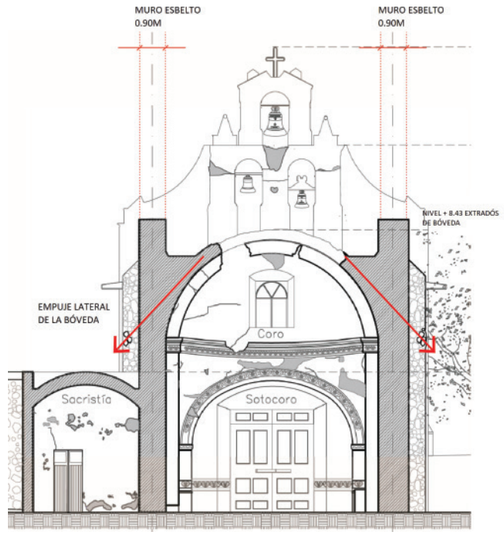
Además de llevar a cabo, durante el transcurso de la obra, acciones preliminares que garantizaran la estabilidad estructural de los elementos que se conservaban.

Al realizar el análisis estructural de la bóveda de cañón que cubría la nave del templo, se encontró lo siguiente: El inmueble está construido a base de muros de piedra mal aparejada y con un mortero de cal muy pobre, denotando una mampostería poco resistente. Al hacer una revisión de la geometría original, se observó la falta de contrafuertes capaces de tomar los empujes horizontales (coceos) de la bóveda; de hecho, como contrafuertes solamente tenía la fachada (que permitió que el tramo de bóveda adyacente se conservara en su sitio), dos pequeños contrafuertes sobre el eje D, los muros del eje B en el acceso al altar y la fachada posterior (eje A) del ábside de la nave, los cuales fallaron provocando el daño de la bóveda.

De acuerdo con los datos del levantamiento, el volumen de la bóveda es de 4.42 metros cúbicos de mampostería por metro cuadrado. La bóveda se dividió por la mitad,

considerando el peso de cada sección ubicado en el CG correspondiente, y a razón de 2 toneladas por metro cúbico de peso volumétrico de la piedra. Se calcularon los coceos mínimo, máximo y promedio de la bóveda (1.55, 2.05 y 3.04 toneladas, respectivamente) encontrándose que en el caso de los coceos máximo y promedio, la resultante de cargas (línea de presiones) quedaba por fuera de la base del muro; y en el caso del coceo mínimo, la resultante se ubicaba por fuera del tercio medio, dejando solamente 40 centímetros del muro como ancho efectivo de soporte. Lo anterior nos indicó que la bóveda se mantenía en su sitio con un equilibrio inestable y el sismo de 2017 hizo evidente esta inestabilidad.

Es importante desarrollar proyectos de restauración para llegar a un diagnóstico e intervenir los inmuebles de la mejor manera posible. El conjunto de Nepopualco representó un reto, tanto por la intervención de la capilla abierta del siglo XVI, como por la solución que se le daría a la cubierta de la nave. Para esto, fue fundamental entender las limitantes del inmueble y la necesidad de implementaciones o soluciones tecnológicas que dieran la respuesta correcta.



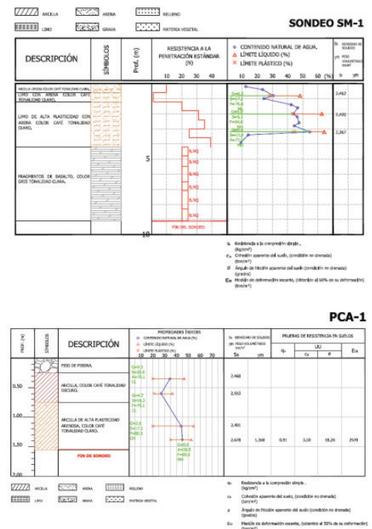


Figura 2. Diagrama con hipótesis de colapso de la bóveda y muros. Se muestran líneas de empuje y fallas observadas. Crédito: Grupo TARES, SA de CV.
Figura 3. Perfil estratigráfico de los sondeos realizados durante el estudio de mecánica de suelos. Crédito: Grupo TARES, SA de CV.

Además del análisis geométrico, se realizaron diferentes estudios como la mecánica de suelos, que arrojó datos del tipo de suelo a base de arcillas y limos, por ende, su resistencia baja. Se analizó la resistividad en la zona de la capilla abierta, para determinar las incidencias en el subsuelo; en este caso se encontró una grieta en el subsuelo, lo que explicaría las condiciones en que se encontraba antes del sismo.

También la arqueología es relevante, porque muchos de estos inmuebles tienen preexistencias arqueológicas que pueden generar incidencias, ya sea por los elementos de

mampostería o por otro tipo de vestigios que se pueden encontrar. Los datos obtenidos llevaron a generar distintas propuestas para mejorar el muro, como aumentar su sección o buscar otra solución, tanto de la capilla abierta del siglo XVI como de la nave.

Propuesta de intervención estructural

La intervención es resultado de un equipo multidisciplinario, se trabaja de la mano de ingenieros, arqueólogos, restauradores, arquitectos, es decir, de un equipo muy amplio para recuperar estos inmuebles y obtener el mejor de los resultados.

A partir del diagnóstico, se determinaron los criterios de restauración cruzando la información y se estimó conveniente rehabilitar la cubierta de la nave a tres aguas para reducir la carga por el tipo de suelo que se tiene, a fin de disminuir la posibilidad de afectaciones en los muros ante otro eventual sismo. Por ello, surgió la necesidad de hacer una cubierta ligera con madera laminada cuyo diseño, de alguna manera, emulara y representara el interior de la bóveda.

De acuerdo con el análisis estructural, para reconstruir la bóveda era necesario construir un sistema de contrafuertes robusto y ligado a los muros de la nave para garantizar la estabilidad del sistema. Esta solución implicaría intervenciones con cambios importantes en la geometría del templo (si bien los contrafuertes se pueden construir sin afectar la construcción en uno de los lados, éstos no se pueden construir sin afectar drásticamente las bóvedas del lado de la sacristía).

Se realizaron varios ejercicios que exploraron las posibles soluciones, si se reforzaban los muros, se podía aumentar masa o integrar contrafuertes, que eran demasiado invasivos para mejorar la capacidad de carga de estos muros, además, considerando que la mampostería con la que están construidos no es la mejor, no eran viables estas opciones.

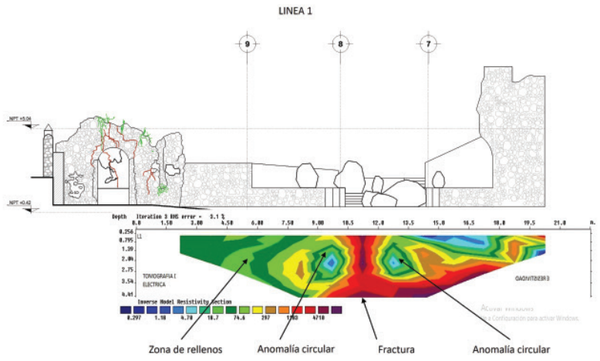


Figura 4. Resultados del estudio de tomografía de resistividad, con ubicación de líneas de análisis. Crédito: Grupo TARES, SA de CV.

Después de este análisis estructural, puede comprobarse que la bóveda no era un elemento estable y que el sismo hizo evidente esta característica. Aunado a ello, la cúpula que se ubicaba en la parte superior, no tenía ningún tipo de apoyo estructural, simplemente estaba colocada sobre la bóveda.

La solución adoptada consistió en sustituir la bóveda original por una cubierta ligera de madera laminada con teja plana de barro. Esta estructura elimina los coceos y mejora el comportamiento sísmico al reducir la carga sobre los muros (el peso de la cubierta se reduce a una tonelada por metro). Se colocó una viga perimetral para soportar las armaduras, y en el coro se reforzó con un diafragma de triplay. El diseño de la cubierta emula la espacialidad abovedada original, preservando la imagen interna del templo. Asimismo, se consideraron y descartaron soluciones con contrafuertes por su invasividad y afectación a la sacristía.

El área del presbiterio se resolvió con una cubierta a tres aguas; en la parte del coro se generó un diafragma con triplay, para aumentar la capacidad de resistencia en esa zona. Sobre la cubierta se colocó teja plana de barro. La madera laminada de pino se conforma por una serie de láminas de madera, que se adhieren con ayuda de sargentos o tornillos de apriete.

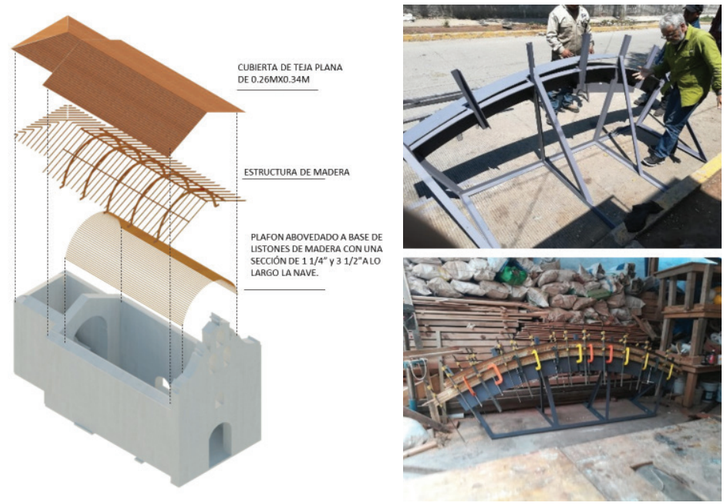


Figura 5. Propuesta de cubierta a dos aguas, con estructura de madera laminada y plafón abovedado. Crédito: Grupo TARES, SA de CV.
Imágenes 5 y 6. Proceso de fabricación e instalación de la estructura de cubierta en sitio. Crédito: Grupo TARES, SA de CV.

Esta innovación tecnológica permitió resolver tanto un problema teórico de cómo generar esa sensación de bóveda, pero sin el peso de lo que implicaba su reconstrucción con mampostería. Fue una propuesta de integración de una cubierta contemporánea fabricada claramente y que pueda entenderse su temporalidad.

La reflexión, en este caso, no es el uso de la madera laminada, sino de la madera por ser un material natural renovable, que significa un menor impacto.





Imagen 7. Vista actual del interior de la nave restaurada, desde el presbiterio hacia el coro. Crédito: Grupo TARES, SA de CV. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/4jC5mv3HE5Y?si=9H4W1NaoD0E1Y4Gr&t=10418*

Imagen 8. Detalle del sistema de apoyo de los arcos laminados sobre muros de mampostería. Crédito: Grupo TARES, SA de CV. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/4jC5mv3HE5Y?si=VPsqGjMbBalJeeMB&t=10455*

Criterios patrimoniales y comunitarios

Además del análisis estructural de la bóveda, también se tomaron como fundamentos de intervención los siguientes aspectos:

- Recuperación de la nave como espacio de culto. Debido al colapso total de la cúpula y casi completo de la bóveda, la gente de la comunidad se mostraba renuente a volver a utilizar la capilla si se reconstruía, por eso se buscó una propuesta para recuperar un espacio que generara una mayor seguridad a los usuarios.
- La espacialidad. Con la propuesta de la cubierta de madera, también se integraría un plafón del mismo material, el cual evocaría la forma de la antigua bóveda y se conservaría la espacialidad que se tenía en el interior antes del sismo.
- La funcionalidad del espacio. Tal como se mencionó anteriormente, uno de los fundamentos fue recuperar el espacio de culto, es decir que se conservara su uso original sin dejarlo como un museo o como un espacio simplemente evocativo.
- Compatibilidad con elementos constructivos que quedaron en pie después del sismo. La cubierta de madera es una estructura ligera compatible con los muros de mampostería.
- Legibilidad actual de la intervención. La utilización de materiales contemporáneos permitirá reconocer la temporalidad de la intervención.
- Seguridad estructural. Con la propuesta de la cubierta a tres aguas, el peso se redujo a una tonelada por metro, se eliminaron los coceos y se generó una estructura contraventeada a nivel de la cubierta, para soportar el sistema de muros en su extremo superior, con lo que la seguridad del templo quedó muy por encima de la requerida por las especificaciones vigentes.







Imagen 9. Vista actual de la cubierta del templo tras su intervención. Crédito: Grupo TARES, SA de CV. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/4jC5mv3HE5Y?si=TChJAYbhcP2xUv3H&t=10514*

Imagen 10. Vista desde el atrio que muestra la integración del templo con su entorno urbano. Crédito: Grupo TARES, SA de CV. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/4jC5mv3HE5Y?si=h72Bajlt47wdMAWT&t=10444*

Conclusión

La intervención de la capilla de María Candelaria o Santiago Apóstol representa un caso ejemplar de restauración integral basada en un diagnóstico técnico, soluciones estructurales contemporáneas y sensibilidad patrimonial. El inmueble actualmente está en uso y fue rehabilitado con la participación activa de la comunidad, que finalizó la intervención pintando el interior y reinstalando los elementos litúrgicos.

Alternativas técnico-constructivas en la intervención de inmuebles históricos: experiencias en Morelos y Guerrero

Ing. Carlos Arce León
Ing. Hugo Hernández Barrios
Arq. David Pineda Muñoz

El estado de Guerrero forma parte de la República Mexicana, se encuentra ubicado hacia la parte sur, en la costa del océano Pacífico (Figura 1). Colinda con los estados de Oaxaca, Puebla, Morelos, Estado de México y Michoacán.

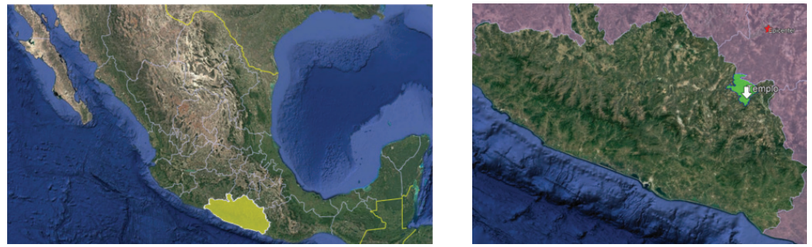


Figura 1. Localización del estado de Guerrero (Google, 2025).
Figura 2. Ubicación del municipio de Olinalá (Google, 2025).

El municipio de Olinalá se ubica en la región denominada como La Montaña, al norte del estado de Guerrero, colindante con el estado de Puebla.



Figura 3. Ubicación del templo de San Francisco (Google, 2025).

Los antecedentes de la comunidad de Olinalá se remontan a tiempos prehispánicos. Ya en 1542, en el Códice Mendoza (INAH, 2015), folio 40 del libro de Los tributos, se le hace referencia como un pueblo tributario de los mexicas (Figuras 4 y 5).

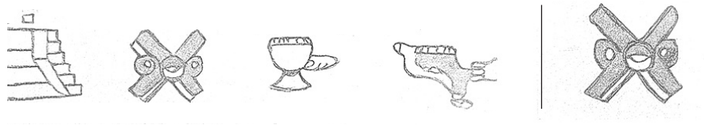


Figura 4. Extracto del folio 40. Nota del editor. Reproducción con IA realizada el 9 de octubre de 2025.
Figura 5. Olinalá pueblo. Nota del editor. Reproducción con IA realizada el 9 de octubre de 2025.

La toponimia de Olinalá se puede asociar a la idea de movimiento, *olin* movimiento y *lan* lugar: "Lugar donde se mueve la tierra". Algunos autores llegan a relacionar las raíces al movimiento del agua o inclusive a personajes (GC SXXI, 2012,). Sin embargo, por el entorno, la más aceptada es la que nos lleva a la tierra donde hay temblores.

La presencia de frailes agustinos y franciscanos en la región, se remonta a los inicios del siglo XVI. Siendo los segundos quienes iniciaron y fueron aceptados por los habitantes de la comunidad; por ello se considera que entre 1535 y 1570 se levantó una capilla dedicada a San Francisco.

Con las modificaciones administrativas, Olinalá dependió del Obispado de Tlaxcala, posteriormente a Puebla y ya en el siglo XIX a Chilapa. Se constituyó como municipio en 1849.

El templo de San Francisco no guarda referencias exactas, por lo cual debió modificarse con el transcurso del tiempo. Por el tipo de sistema estructural y los diversos materiales empleados, se presume que adquirió su forma actual ya entrado el siglo XIX. La torre campanario fue añadida a inicios del siglo XX.

Ubicación del templo de San Francisco

El templo se encuentra ubicado en la calle Vicente Guerrero 13, entre las calles de Francisco Javier Mina y Zaragoza, al oeste y este, respectivamente. Al sur se encuentra la calle de Ramón Ibarra Poniente. Sus coordenadas geográficas son 17° 46.698'N, 98° 44.395'O (Figura 6).



Figura 6. Croquis de localización. Fuente: Elaboración propia (Google, 2025).

Descripción del proyecto

El sistema estructural del templo de San Francisco es una combinación de diferentes elementos estructurales y estilos. Hay muros de mampostería de diferente tipo en la altura, la cubierta está integrada por losas macizas de concreto reforzado apoyadas perimetralmente en arcos. Cuenta con tres bóvedas que integran el transepto. Sobre el crucero se levanta el tambor de planta octagonal y es coronado por una cúpula con linternilla. La torre campanario es un elemento que se añadió de manera posterior, es de mampostería; el campanario en sí, era de dos cuerpos. Por la diferencia en tiempos de construcción, existe una junta o interfase entre la torre campanario y la fachada del templo. Hay contrafuertes mixtos de concreto reforzado y de mampostería. Se considera que la forma actual se desarrolló en tres etapas constructivas, claramente diferenciadas por sus elementos. Las dimensiones generales de la nave son de 15 por 50 metros con una altura de 12 metros. La torre campanario está desplantada sobre una superficie de 3.80 por 3.80 con una altura de 22 metros. El espesor promedio de los muros es de 150 centímetros.

La fachada principal se compone por un acceso central en sillería de cantera rosa, enmarcado por dos pilastras de sección cilíndrica adosadas al muro. Cuenta con un óculo que corresponde al área del coro, y como remate un imafronte semicircular y un reloj de mampostería de tabique. En las laterales al acceso se disponen dos pilastras de base rectangular. La base se encuentra fabricada en mampostería de cantera y tabique, mientras que en la parte superior son elementos y sillería de cantera y piedra. En el lateral norte se dispone la torre campanario y el cuerpo restante del campanario. La torre presenta un aplanado de mortero de cal y mortero de cemento en algunas secciones, con recubrimiento de pintura vinílica en tonalidad blanca. Se aprecia en las fachadas laterales la fábrica constitutiva, mampostería mixta con piedra braza de diferentes dimensiones y detalles de tabique con mortero de cal-arena.

Los daños resultantes del sismo del 19 de septiembre de 2017 fueron agrietamientos, principalmente en las cubiertas sobre el coro y en algunos muros. Sufrió el colapso completo del segundo cuerpo del campanario y el primero quedó severamente dañado (Figuras 7 y 8).

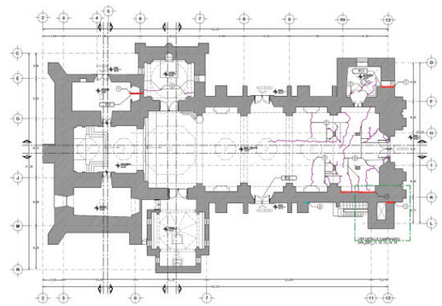




Figura 7. Levantamiento de daños. Fuente: Elaboración propia.
Figura 8. Daños en el campanario. Fuente: Elaboración propia. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/4jC5mv3HE5Y?si=cJpntuF-BA-_5KZJT&t=10742*

La mampostería tiene una gran capacidad de flexibilidad y readaptación geométrica, que es de gran utilidad al disipar la energía inferida en la estructura, particularmente a raíz de un evento sísmico.

Cuando el elemento se conforma exclusivamente por mampostería, por tratarse de elementos de sección amplia, la rigidez puede considerarse constante en su longitud, generando un comportamiento uniforme y monolítico. Sin embargo, los deterioros generados por la poca capacidad para absorber esfuerzos de tensión, se presentan como fisuras entre sillares o piezas del material constitutivo, desplomes y fallas en el anclaje.

Por otro lado, al existir alteraciones en el sistema constructivo e integrar elementos con diferente rigidez (diafragmas de concreto armado en este caso), el elemento no puede considerarse como continuo. En este caso, las columnas se comportan de forma independiente en cada cuerpo. Debido a esta condición, los desplazamientos que se generan a partir de las demandas sísmicas, están sujetos a la capacidad de tensión de los elementos de manera individual (columnas o pilastras), y no de la torre globalmente. Adicionalmente, al dividir la altura total en cuerpos independientes, se incrementa la frecuencia de respuesta del sistema, disminuyendo el periodo de vibración natural del conjunto.

Debido a las condiciones que registró el primer cuerpo, se tomó la decisión de demolerlo totalmente y reponerlo con uno de un solo cuerpo, con una geometría diseñada acorde con los elementos existentes, pero considerando un sistema de control de respuesta pasivo colocado en su base.

Con el aislamiento sísmico se reducirán las demandas de esfuerzos en la estructura del campanario y en su base; sin embargo, se revisaron los desplazamientos máximos que se pueden presentar por los dispositivos de aislamiento, y que la descarga de su propio peso no ocasione una concentración de esfuerzos que pudieran ocasionar una distribución irregular en la zona de la torre.

El aislamiento de base en el campanario se realizó a una altura de 11.70 metros, es decir que descansa sobre la parte inferior del campanario que no colapsó. La altura del campanario quedó en alrededor de 8.4 metros. En las figuras 9 y 10 se presentan las vistas de las fachadas poniente y norte, respectivamente, en las que se expone la propuesta geométrica para la reposición del campanario. La propuesta consistió en un solo cuerpo con una altura de 6.1 metros. Dadas las condiciones del proyecto, el punto adecuado para colocar el sistema de aislamiento es en el nivel +11.70, en la parte superior de la torre.

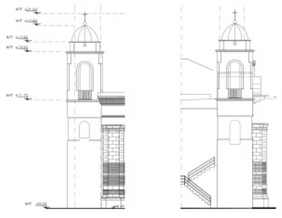


Figura 9. Propuesta fachada poniente. Fuente: Elaboración propia.
Figura 10. Propuesta fachada norte. Fuente: Elaboración propia.

Como es usual en este tipo de sistemas, existe un cambio de rigidez de consideración al pasar del plano de la fachada al campanario, de ahí la susceptibilidad a sufrir daños ante eventos extraordinarios. Al colocar un sistema de aislamiento de base, se pretende que la demanda de desplazamientos se absorba en ese punto.

Estructuración

El nuevo campanario cuenta con cuatro dispositivos de aislamiento sísmico de base, colocados en la zona de transición localizada entre la torre existente y el campanario nuevo, justo en la zona en la que el campanario comienza a sobresalir en elevación del resto de la estructura de la parroquia. Con estos dispositivos se pretende modificar el comportamiento dinámico del nuevo campanario evitando, o reduciendo considerablemente, la transmisión de esfuerzos inducidos en la estructura por un movimiento sísmico.

Los aisladores se colocaron sobre un marco de concreto reforzado, con el objeto de transmitir la carga a la estructura de mampostería existente de una manera más uniforme. Los aisladores reciben el peso del campanario a través de una plataforma conformada por perfiles estructurales y una losa de concreto. El campanario consta de cuatro columnas, un tambor y un capulín, los cuales se construyeron con ladrillos de barro recocido de la zona. Cuenta con un refuerzo interno de elementos de concreto reforzado considerado como confinamiento (Figura 11).

Adicionalmente cuenta con una serie de campanas de hierro, de dos tamaños, las más pequeñas fueron colocadas en los extremos, mientras que a la mayor le corresponde la parte central. Estas campanas son soportadas por vigas de madera a fin de no modificar o alterar su sonido.

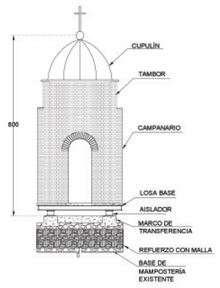


Figura 11. Sistema de aislamiento. Fuente: Elaboración propia.

Consideraciones de análisis

Una vez definidas las características geométricas de la propuesta de restitución del campanario se procedió con el diseño del diseño del sistema de aislamiento, para lo cual se desarrolló un modelo de elemento finito. Con el objetivo de lograr una representación congruente con la estructura real, se emplearon diversos tipos de elementos. Para el modelado del campanario y su base se consideraron elementos tipo “sólido”, mientras que para los aisladores sísmicos se emplearon elementos tipo “link”.

Asimismo, para realizar un análisis paso a paso no lineal, se tomaron en cuenta los registros de aceleración correspondientes al sismo del 19 de septiembre de 2017 (IINGEN, 2018). Del total de la base de datos, se analizaron particularmente dos registros, los denominados Raboso y Huamuxtitlán. El primero fue el más cercano al epicentro, mientras que el segundo fue el más próximo al templo en Olinalá.



Figura 12. Registro de aceleración en Olinalá. Fuente: Google, 2025.

Adicionalmente, se realizó un análisis modal espectral con base en el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad versión 2015 (MDOC-CFE-Sismo, 2015), y en el diseño de los elementos de concreto y mampostería, en las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-Mampostería) (2017), de Acero (NTC-Acero) (2017) y de Concreto (NTC-Concreto) (2017).

Materiales

No se realizaron ensayes de laboratorio en muestras de sitio, por lo que para las propiedades mecánicas de la mampostería existente se emplearon los valores resaltados en la Tabla 1, adaptada de Meli (1998).

Material	Peso volumétrico (t/m³)	Resistencia a compresión (kgf /cm²)	Resistencia a cortante (kgf /cm²)	Módulo de elasticidad (kgf /cm²)
Adobe	1.8	2-5	0.5	3 000
Bloques de tepetate con mortero de cal	1.8	5-10	0.5	5 000
Ladrillo con mortero de lodo	1.6	5-10	1.0	50 000
Ladrillo con mortero de cal	1.6	15-20	2.0	10 000
Mampostería de piedra irregular con mortero de cal	2.0	10-15	0.5	5 000
Mampostería de piedra de buena calidad	2.0	30	2.0	20 000

Tabla 1. Propiedades mecánicas de algunos tipos de mampostería. Fuente: Elaboración propia.

Para el refuerzo interno de la estructura del campanario se consideró emplear un concreto con una resistencia a la compresión (f'c) de 250 kilos por centímetro cuadrado (kg/cm²), así como para el marco inferior de transferencia. El módulo de elasticidad (Ec) considerado para este material fue de 233 mil 456.35 kg/cm² con un peso volumétrico de 2 mil 400 kilos por metro cúbico (kg/m³).

En el caso del acero estructural para la plataforma de soporte se emplearon perfiles con acero A-36 y A-50 con un esfuerzo de fluencia de fy de 2 mil 530 y 3 mil 515 kilos por centímetro cuadrado, respectivamente. Se consideró un módulo de elasticidad de Ec=2 millones 39 mil kilos por centímetro cuadrado y un peso volumétrico de 7 mil 850 kilos por metro cúbico.

El peso volumétrico para la mampostería de la reconstrucción del campanario se consideró con un peso volumétrico de mil 700 kilos por metro cúbico.

Acciones sobre la estructura

Para realizar el análisis paso a paso, se emplearon registros acelerométricos del sismo del 19 de septiembre de 2017, los cuales se introdujeron al modelo para simular, evaluar la respuesta estructural y diseñar el sistema de aislamiento de base. Se utilizaron los registros de las estaciones de Raboso (RABO) y Huamuxtitlán (HMTT) por ser los más cercanos a la ubicación del epicentro y del templo. La longitud de los registros considerada fue la correspondiente al 90 por ciento de la intensidad de Arias.

Para el registro de la estación Raboso (Figura 13) se muestran las tres direcciones con sus valores máximos: Norte-Sur (154.69 cm/s^2), vertical (117.87 cm/s^2) y Este-Oeste (129.56 cm/s^2).

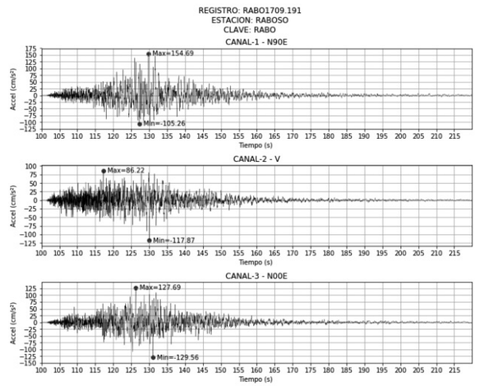


Figura 13. Registro estación Raboso. Crédito: Elaboración propia.

Para el registro de la estación Huamuxtitlán (Figura 14) se muestran las tres direcciones con sus valores máximos: Norte-Sur (170.47 cm/s^2), Este-Oeste (143.87 cm/s^2) y vertical (91.71 cm/s^2).

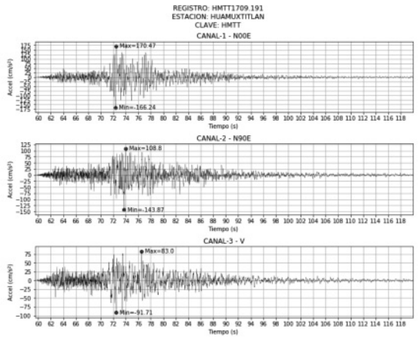


Figura 14. Registro estación Huamuxtitlán. Crédito: Elaboración propia.

Combinación de las acciones

Una primera condición fue una revisión exclusivamente de la estructura del campanario bajo carga gravitacional. Se verificó que los perfiles propuestos y todos los elementos constituyentes, cumplieran con los requerimientos de seguridad y servicio. En esta condición no se consideraron efectos sísmicos para su diseño, ya que la transmisión de esfuerzos al campanario es reducida por la presencia de los aisladores sísmicos.

La segunda condición fue el análisis sísmico, tanto modal como paso a paso, de la estructura. Se consideraron las tres componentes de cada uno de los registros sísmicos actuando de manera simultánea. Para cada evaluación se midió la respuesta de los aisladores y los esfuerzos en la mampostería. En esta revisión se considera presente el peso propio de la estructura.

Análisis y revisión

Primera combinación

El peso propio del campanario se calculó con base en la geometría y los pesos volumétricos de los materiales empleados. Con el modelo numérico de elementos finitos se revisaron los niveles de esfuerzos en la mampostería. En el modelo se tienen 8.32 metros cúbicos de concreto y 40.1 metros cúbicos de mampostería, considerando pesos volumétricos de 2 mil 400 y mil 700 kilos por metro cúbico, respectivamente. El peso total del campanario es del orden de 94 mil 950 kilos. Este valor considera una carga extra por el concepto de campanas (cuatro campanas de 800 kilos y una de mil 200), acabados y detalles adicionales. Se puede considerar una descarga de 25 mil kilos por aislador.

Valor base para el diseño de la plataforma que soportará el conjunto. Estos valores se verificaron al realizar los análisis con el modelo de elemento finito. Los esfuerzos de compresión y cortante en la mampostería, se encontraron muy por debajo de los límites recomendados para la mampostería de arcilla.

Para soporte de las campanas se diseñaron vigas de madera, se escogió este material para no interferir con la sonoridad intrínseca de las campanas. En cuanto al diseño de la viga de madera, se consideraron las dimensiones de 90, 55 y 106 centímetros para su diámetro inferior, diámetro superior y para su altura, respectivamente; un espesor uniforme de 5 centímetros y un peso específico para el hierro de 7 mil 900 kilos por metro cúbico, lo que arrojó un total de 850 kilogramos por campana. Al agregarse el vástago, viga, accesorios y factor de carga, el total considerado fue de mil 200 kilos. En el diseño se revisaron momento flector y cortante (NTC-Madera, 2017).

Segunda combinación

En el diseño y revisión ante carga lateral, se tomaron en cuenta aisladores del tipo elastómero con núcleo de plomo, LASTO LRB C-300-120 (Mageba, 2019). Además de dos series de análisis no lineal paso a paso, incluyendo las tres componentes de aceleración de los registros de las estaciones Raboso y Huamuxtitlán. También se estudiaron efectos P-Delta y la posibilidad de grandes desplazamientos. No se modelaron los muros del templo con los que hace contacto la base del campanario, se consideró más desfavorable un desacoplamiento del resto de la estructura. Este efecto es visible en el agrietamiento que se generó en los costados de la torre.

Con los resultados del análisis se verificó que los valores de carga axial, cortantes y desplazamientos del aislador no excedieran los límites de diseño. Se utilizaron cuatro aisladores para dar un soporte estable al conjunto, que se ubicaron en la base de cada una de las columnas en la zona donde los perfiles principales de acero de la plataforma de sustento se intersectan. Su colocación fue para darle estabilidad y evitar concentraciones de esfuerzos.

Considerando el registro Raboso, se muestran los resultados para un aislador de fuerza axial contra tiempo (Figura 15), y desplazamiento en valor absoluto contra tiempo (Figura 16).

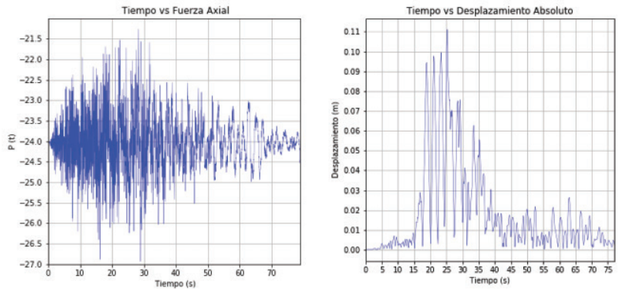


Figura 15. Variación de la fuerza axial. Crédito: Elaboración propia.
Figura 16. Variación del desplazamiento. Crédito: Elaboración propia.

Las curvas de histéresis generadas a partir del comportamiento no lineal del aislador con centro de plomo, se generan a partir del desplazamiento en la dirección U2 y el cortante V2 (Figura 17) y el desplazamiento en la dirección U3 y el cortante V3 (Figura 18).

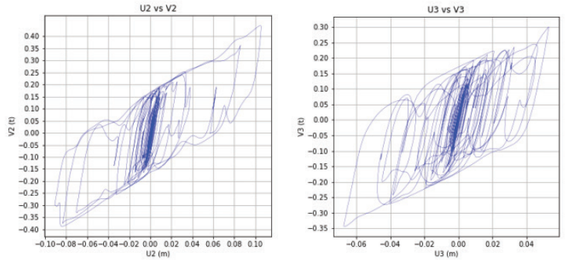


Figura 17. Gráfica U2 *vs.* V2. Crédito: Elaboración propia.
Figura 18. Gráfica U3 *vs.* V3. Crédito: Elaboración propia.

Se aprecia que la fuerza axial en los aisladores oscila entre -26.5 t y -21.5 t. Esto es debido al efecto de la aceleración vertical inducida al modelo. Al inicio, el valor inicial es de aproximadamente -24 t, considerando los cuatro aisladores se tiene una descarga total 96 t. No se rebasa la capacidad de carga del aislador en ningún momento ya que, de acuerdo con las especificaciones, soporta 341 kN (34.76 t). En el caso del desplazamiento, apreciamos que no se rebasa el desplazamiento máximo del dispositivo que es de 12 centímetros; tampoco se excede su capacidad para el caso del cortante, ya que en el análisis se alcanzan valores máximos del orden de 0.48 t y el dispositivo resiste una fuerza cortante de hasta 34 kN (3.4 t).

Realizando una verificación, se comprobó que los esfuerzos de compresión se concentraron justo en la zona localizada por debajo del marco de transferencia de concreto reforzado. Se uniformiza rápidamente al descender por la torre. Los valores encontrados se ubicaron dentro de los límites recomendados. Sin embargo, con el objeto de mejorar la condición de confinamiento en la zona de transición, se propuso un refuerzo con malla de fibra de vidrio en el perímetro (Mapei, nd).

Con respecto a los esfuerzos cortantes, los niveles mostrados para la dirección 1-3 (Figura 19) y 2-3 (Figura 20), estaban por debajo de los niveles aceptables para este tipo de mampostería. Como es natural, hay concentraciones de esfuerzos cortantes en las esquinas de las aberturas y transiciones; sin embargo, los mayores (±0.5kgf/cm²) fueron muy localizados y no se consideró necesario un refuerzo, ya que físicamente no se generó agrietamiento en estas zonas durante el sismo.

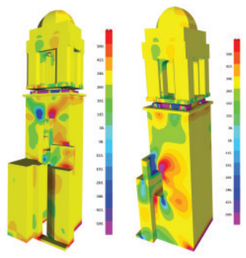


Figura 19. Esfuerzos en dirección S13. Crédito: Elaboración propia.
Figura 20. Esfuerzos en dirección S23. Crédito: Elaboración propia.

Proceso constructivo

Durante el proceso constructivo se presentaron condicionantes que llevaron a desarrollar procedimientos diferentes a los tradicionales. Se requirió realizar un sistema de soportes temporales que permitiera seguir el proceso de edificación y, una vez instalado el sistema de aisladores, realizar la transferencia de carga. En la figura 21 se pueden apreciar el sistema de soporte temporal, las losas de transferencia y uno de los aisladores de base. En la figura 22 se ilustra el campanario finalizado.





Figura 21. Colocación de aislador. Fuente: Mageba. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/4jC5mv3HE5Y?si=IAwx2lNQLL2Vyz6S&t=10991*
Figura 22. Campanario finalizado. Fuente: Mageba. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/4jC5mv3HE5Y?si=2q5LZUKGoX-bq1I-H&t=10988*

A casi dos años de haber concluido la instalación de los dispositivos, el 7 de septiembre de 2021, ocurrió un sismo de magnitud 7.1 con epicentro ubicado a 14 km al suroeste de Acapulco, Guerrero (N 16.7553, W 99.9533). De acuerdo con los reportes, no hubo daños en el campanario ni en la torre. Únicamente se marcó la zona de interfase de la torre con la fachada, pero no se colocó un sistema de monitoreo del comportamiento que permitiese seguir, evaluar y analizar la eficiencia del sistema.

Conclusiones

Para desarrollar un proceso de intervención es necesaria la evaluación de diferentes opciones, considerar las características, tanto numéricas como de proceso. Las condiciones de cada proyecto son particulares, y se definen aspectos relevantes desde la realización de los levantamientos de daños iniciales y las propuestas de apuntalamiento o estabilización empleados.

De ahí la necesidad de explorar los sistemas de control de respuesta, conocer sus posibilidades y potenciales, para fomentar su aplicación en estructuras de patrimonio arquitectónico como una opción que permita mejorar su desempeño, fundamentalmente ante la ocurrencia de sismos.

Una herramienta útil en la evaluación de estructuras es la instrumentación. Los datos que arroja tanto en estructuras existentes como en prototipos realizados, son de suma relevancia en la evaluación de desempeño, daño, acumulación de daño, pérdida de rigidez, etcétera.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración y el apoyo de todas las personas involucradas en el proyecto, particularmente a las arquitectas Rocío García Camarero, Aimée Mancilla Porraz y Jessica Frías, a los ingenieros Daniel Dueñas González, Eduardo Medina López, Cristian Castro Santiago, Juan Carlos Delgado Trejo, Carlos Méndez Galindo y Luis Abraham Durán Pérez; y a la Dirección de Apoyo Técnico del Instituto Nacional de Antropología e Historia.

Fuentes de información

CFE. (2015). *Manual de diseño de obras civiles de la Comisión Federal de Electricidad*, versión 2015.
Gobierno de la CDMX. (15/12/2017). Normas técnicas complementarias para el diseño y construcción de estructuras de acero. *Gaceta Oficial del Gobierno de la Ciudad de México*.
Gobierno de la CDMX. (15/12/2017). Normas técnicas complementarias para el diseño y construcción de estructuras de concreto. *Gaceta Oficial del Gobierno de la Ciudad de México*.
Gobierno de la CDMX. (15/12/2017). Normas técnicas complementarias para el diseño de estructuras de madera. *Gaceta Oficial del Gobierno de la Ciudad de México*.
Gobierno de la CDMX. (15/12/2017). Normas técnicas complementarias para el diseño y construcción de estructuras de mampostería. *Gaceta Oficial del Gobierno de la Ciudad de México*.
Google. (2025). Google Earth Pro (7.3.6.10201 (64-bit)).
Guerrero Cultural Siglo XXI. (2012). *Enciclopedia Guerrerense*/Municipio de Olinalá. En https://enciclopediagro.mx/indice-municipios/municipio-de-olinala/
IINGEN. (30 /11/2018). *Base de datos de registros acelerográficos de la Red Sísmica Mexicana V2*. En *https://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/Inicio.aspx*
INAH. (2015). *Códice Mendoza*. Manuscrito digitalizado. En *https://codicemendoza.inah.gob.mx/inicio.php?lang=spanish*
Mageba. (2019). *LASTO-LRB*. En *https://www.mageba-group.com/latam/es/1026/Infraestructuras/Proteccion-sismica/LASTO-LRB/LASTO-LRB.htm*
Mapei. (nd). *Mapegrid G220*. Hoja técnica. En *https://www.mapei.com/mx/es-mx/productos-y-soluciones/lista-de-productos/detalles-del-producto/mapegrid-g-220*
Meli, R. (1998). *Ingeniería estructural de los edificios históricos*. Primera edición. Fundación ICA. IINGEN.

El aislamiento sísmico en estructuras de mampostería para la conservación del patrimonio

Ing. Stefano Barone

Expuesto por **Ing. Sergio Aguilar Sanders**

Esta presentación se dirige básicamente a la restauración preventiva. Revisamos un par de ejercicios: el tema de los ensayes de los dispositivos antisísmicos y las fases constructivas del aislamiento de base. Se hablará todo el tiempo de mampostería. Si bien se han hecho reparaciones en concreto reforzado en estructuras existentes y también en acero, no es común —al menos no tengo conocimiento— que se haya hecho en México una actualización sísmica al día de hoy en mampostería; de hecho, el reglamento no lo tiene contemplado en las Normas Técnicas Complementarias de 2023 (NTC-2023).

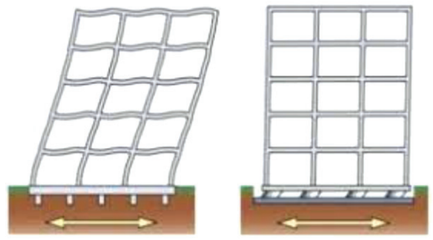


Figura 1. El aislamiento sísmico es una estrategia bien definida para protección contra sismos. Fuente: Diagrama de Stefano Barone. Archivo: Ing. Riccardo Vetturini de INGENIUM, *https://riccardovetturini.com*

Lo que estamos buscando con el aislamiento, es mover el periodo desacoplando la estructura a nivel de la base y proteger elementos estructurales y no estructurales. Las estructuras permanecen funcionales después del sismo, se minimizan de manera significativa las pérdidas directas e indirectas, y se incrementa la resiliencia estructural.

La intención es actualizar el patrimonio histórico y estructuras antiguas con un aislamiento de base que reduce la vulnerabilidad.

El punto de arranque aquí para hablar de este tipo de estructuras, poder realizar este tipo de solución es un tema geométrico, que es el tema de los espacios perimetrales. Si no los tenemos, no funciona; por lo que es importante aclararlo de origen.

Con respecto al tema de la Ciudad de México, ¿qué tan factible o no, lo es? Pensando en la zona centro, en la zona lacustre, porque tiene un periodo amplio y por los hundimientos diferenciales.

Si llega a existir una estructura que tuviera pilotes de control por un lado y, por el otro, el periodo de la estructura se pudiera llevar de 4.5 a 5 segundos, "podría ser una solución", pero deberá analizarse.

Son dos los ejercicios que se presentan, la Villa La Maddalena y la Escuela Giacomo Matteotti, en Italia. Los dispositivos que se utilizaron para estas soluciones fueron aisladores de alto amortiguamiento: los High Damping Rubber Bearing o HDRB, una especie de cojinete de caucho de alta amortiguación, y unos apoyos deslizantes libres tipo TETRON®.

Se analizaron y diseñaron bajo la normativa europea, que es muy similar a las Normas Técnicas Complementarias de la Ciudad de México; para los apoyos deslizantes de igual manera, de acuerdo con la normativa europea (EN1337).

El edificio agrícola Villa La Maddalena es una estructura construida en la primera mitad del siglo XVII por el cardenal Angelo Giori; tiene dos niveles de altura de mampostería y una forma rectangular de 40 metros de largo por 6 metros de ancho. Los elementos de carga verticales, los apoyos, son de mampostería de piedra y columnas de ladrillo, robustas. Hay ausencia de dinteles resistentes a sismos.

Después del sismo de 2016 hubo daños importantes, lo cual mostró que tiene una alta vulnerabilidad sísmica.



Edificio agrícola "Villa La Maddalena" (2/5)

N° 87 ISOSISM® HDRB-H 500x156

Parameter	Value
Rubber diameter, D_r	500 mm
Rubber height, T_r	156 mm
Total height, H	282 mm
Side length of outer steel plates, B	550 mm
Weight, W	281 kg
Maximum static vertical load, $N_{ULS,max}$	2000 kN
Maximum seismic vertical load, $N_{Ed,max}$	900 kN
Design displacement, d_{bd}	±185 mm
Maximum displacement, d_{max}	±300 mm
Shear deformation at d_{bd}, d_{bd}/T_r	119%
Shear deformation at d_{max}, d_{max}/T_r	192%
Effective horizontal stiffness, $K_{eff}(d_{bd})$	0.63 kN/mm
Vertical stiffness, K_v	≥ 504 kN/mm
Equivalent viscous damping, $\xi_{eq}(d_{bd})$	14.0%

Front view

Figura 2. Imagen y mediciones del edificio agrícola Villa La Maddalena. Diagrama y fotografía: Elaboración del autor.

Después de haber hecho todos los análisis correspondientes, se determinó que se requería un aislador con una carga vertical de 200 toneladas, con unos desplazamientos de ±300 milímetros, una rigidez horizontal de 0.63 kN/mm y un amortiguamiento de 14 por ciento.

Con respecto a los sliders o los tetrones® libres, la carga naturalmente es la misma, al igual que el desplazamiento, con algunas dimensiones distintas a los anteriores.

El objetivo de los sliders, o apoyos libres, es hacer coincidir dentro de lo posible el centro de rigidez con el centro de masa; si no se hace de esa manera, se producirían unas torsiones y algunos otros problemas que se generarían en el edificio.

Los aisladores están en un desnivel y una losa que funciona como diafragma rígido.

Lo que se evalúa son los índices de riesgo del estado límite de seguridad de vida. Existen varias formas de hacerlo, básicamente lo que se hizo en la Villa La Maddalena fue considerar una serie de parámetros en donde tenemos el periodo fundamental de la estructura empotrada. En las condiciones en las que está, 0.346 segundos, el periodo del edificio ya aislado se incrementó prácticamente ocho veces; ese aumento en el periodo, disminuye en el espectro de manera importante y bajan las aceleraciones.

La aceleración que se tenía era de 0.621g estando fija, bajamos a 0.08g ya aislada; es decir que básicamente las fuerzas de la aceleración con las que habría que diseñar, las bajamos a 12 por ciento.

Edificio agrícola "Villa La Maddalena" (4/5)

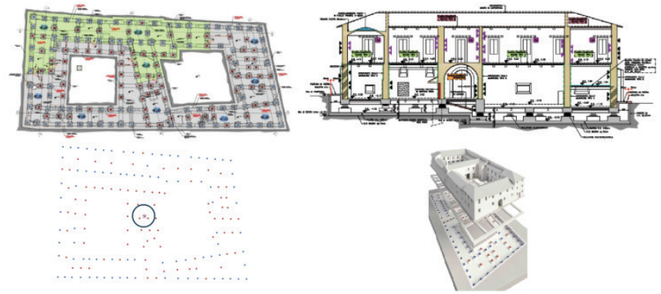


Figura 3. Diagrama de aceleraciones del edificio agrícola Villa La Maddalena. Diagrama y fotografía: Elaboración del autor.

Es una forma inversa de reforzar. En vez de hacer algún reforzamiento de manera distinta, lo que estamos haciendo es retirarle esos esfuerzos que tienen las estructuras. Entonces, se obtienen posteriormente algunos índices en los cuales vemos la capacidad de demanda de la aceleración del suelo máxima contra la demanda que soporta la estructura, y observamos que tiene un 20 por ciento de capacidad. Esto representa un periodo de retorno de 10 años, lo cual naturalmente no puede ser, porque significa que esta estructura tendrá problemas en poco tiempo. Por otro lado, tomando los valores de la estructura ya aislada, observamos que esa relación subió a 1.050, es decir que su periodo de retorno ya subió a 532 años.



Escuela "Giacomo Matteotti" (2/5)

N° 94 ISOSISM® HDRB-H 550x155

Parameter	Value
Rubber diameter, D_r	550 mm
Rubber height, T_r	155 mm
Total height, H	295 mm
Side length of outer steel plates, B	600 mm
Weight, W	488 kg
Maximum static vertical load, $N_{ULS,max}$	3000 kN
Maximum seismic vertical load, $N_{Ed,max}$	2500 kN
Design displacement, d_{bd}	±153 mm
Maximum displacement, d_{max}	±300 mm
Shear deformation at d_{bd}, d_{bd}/T_r	99%
Shear deformation at d_{max}, d_{max}/T_r	194%
Effective horizontal stiffness, $K_{eff}(d_{bd})$	1.76 kN/mm
Vertical stiffness, K_v	≥ 1408 kN/mm
Equivalent viscous damping, $\xi_{eq}(d_{bd})$	16%

Front view

Figura 4. Imagen y mediciones de la escuela Giacomo Matteotti. Diagrama y fotografía: Elaboración del autor.

La escuela Giacomo Matteotti, construida a finales de 1930, se inauguró en 1940. Es un edificio de tres niveles de mampostería con entrepisos de 4 metros aproximadamente, con pocos elementos de muros transversales de cortante, una concepción estática, mampostería de piedra y ladrillos; tiene una estructura irregular en forma de "E", crítica

en condiciones sísmicas, ya que al ser una estructura irregular, es lo que más castiga la normativa. Por consecuencia, el edificio tiene una alta vulnerabilidad sísmica.

La solución es la misma: hacer coincidir el centro de masa con el centro de rigidez de la estructura.

De esta manera, se hace el ensayo de los dispositivos de acuerdo con la normativa europea y se van verificando desplazamientos, velocidades máximas y las cargas verticales, con base en un protocolo de cómo se deben hacer las pruebas.

Se toman en cuenta las tolerancias, para tener de manera muy clara que se está cumpliendo con la normativa correspondiente. Es importantísimo insistir siempre en ello para que lo pidan los diseñadores.

Ahora, ¿cómo se hace?

Se tiene la estructura en condiciones normales y lo que haremos es colocar una viga metálica en la parte superior para, posteriormente, realizar la excavación y el retiro del terreno. Hecho esto, se construye una nueva losa de cimentación de concreto reforzado.

La viga que se puso al inicio, básicamente es para contar con un apuntalamiento antes de empezar cualquier retiro de la mampostería, porque sabemos que es algo inestable. En seguida, se hace la fijación para iniciar de uno de los lados; luego se realiza la demolición de la mampostería, se coloca un puntal y se ejecuta el mismo procedimiento del otro lado.

Posteriormente, se procede a construir una pequeña zapata de concreto reforzado con las reservaciones, las cuales es importante dejarlas para los pernos y se realice la colocación y fijación.



Figura 5. Diagrama de aceleraciones de la escuela Giacomo Matteotti. Fuente: Elaboración del autor. Fuente: Diagrama de Stefano Barone. Archivo: Ing. Riccardo Vetturini de INGENIUM, *https://riccardovetturini.com*

De la misma manera, se construye la viga de concreto reforzado en el muro para instalar la placa superior de mampostería. Finalmente, se procede a colocar el aislador.

Para evitar un tema de asentamientos, colocamos unos gatos planos. Se hace la inyección con mortero de alta resistencia, se remueven los puntales del piso y para concluir se hace el corte de los puntales de la mampostería.

Es importante dejar un acceso para poder revisar a futuro los aisladores, así como también dejar un espacio para que pueda existir el movimiento del terreno. La trinchera queda cerrada.



Figura 6. fases constructivas de aislamiento de base en mampostería. Diagrama y fotografía: Elaboración del autor.



Figura 7. Aisladores de alto amortiguamiento HDRB ISOSISM®, apoyos deslizantes libres TETRON® CD GL con el objeto de apoyar en el diseño y ensaye de los aisladores de acuerdo a la norma EN 15129:2009 y NTC 2018 Diseño de los apoyos deslizantes libres (*sliders*) de acuerdo a la norma EN 1337. Fuente: Ing. Riccardo Vetturini de INGENIUM.

Conclusiones

Se vieron dos edificios de mampostería actualizados sísmicamente con aisladores, con los apoyos deslizantes por el tema de la torsión.

Estos inmuebles podrán resistir el 100 por ciento de la acción sísmica de diseño, proveyendo protección total durante los sismos y garantizando la continuidad de operación posteriormente.

Hay una protección sísmica total de los edificios para el estado límite de seguridad de vida, el índice de los riesgos es mayor a uno, el 100 por ciento.

No hay daño estructural y no estructural. Los monumentos históricos podrían compararse con hospitales, porque el patrimonio tiene un valor enorme, por lo que los contenidos no estructurales son esenciales. Se mitigan las pérdidas esperadas de manera directa e indirecta y hay una resiliencia mucho mayor.

La planeación del aislamiento implementada eficientemente por macroáreas, nos permite avanzar con una velocidad razonable y no hace necesario desalojar durante el proceso de recuperación.

*Fotografías/*slides*/gráficas tomadas de presentación compartida para el Encuentro por parte de Stefano Barone.

Mesa 3
Innovación y uso de tecnología en la conservación del patrimonio cultural







Moderador: **Mtro. Manuel Villarruel Vázquez**
Director del Centro INAH de Puebla

Secretario: **Dr. Juan Carlos García Salas**
Secretario del I Consejo Directivo de la Asociación Alumni México Francia

Para mayor detalle escanea el código QR y podrás ver la transmisión completa de esta sección del Encuentro México y Francia

Crédito: INAH-Ángel Mora Flores. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.





Notre Dame de París: una catedral de datos digitales y conocimientos multidisciplinarios para las ciencias del patrimonio cultural

Dr. Livio de Luca
Director de Investigación en el Centro Nacional para la Investigación Científica



La tecnología al servicio del patrimonio: el diagnóstico a través de los métodos geofísicos

Dr. José Ortega Ramírez
Responsable del Laboratorio de Geofísica de la Subdirección de Laboratorios y Apoyo Académico del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH)





Digitalizando el Puuc

Arqlgo. José G. Huchim Herrera
Director del Proyecto Arqueológico Uxmal así como de la Zona Arqueológica de Uxmal y la Ruta Puuc

Arqlgo. Héctor Emmanuel Cauich
Equipo de registro digital de Uxmal y la Ruta Puuc



La fotogrametría digital en la arqueología subacuática: explorando el patrimonio sumergido de México con tecnología de vanguardia

Dr. Roberto E. Junco Sánchez
Subdirector de Arqueología Subacuática del INAH

Nota: Imágenes con enlace Web fueron transmitidas por INAH TV durante el evento realizado en el Auditorio Jaime Torres Bodet (Museo Nacional de Antropología).

Crédito: CICM-Imagen en evento. Esta página
Excepto retratos oficiales de ponentes.

Presentación

La presente mesa de análisis aborda, desde diferentes perspectivas, metodologías que conllevan el uso de tecnologías de prospección e investigación para el estudio, conocimiento y determinación de decisiones con el fin de lograr una mejor intervención para la conservación del patrimonio en diferentes latitudes. Así, la convergencia entre innovación tecnológica y conservación patrimonial, señala la importancia del uso de tecnologías emergentes, tanto en arqueología terrestre como subacuática, así como en la gestión de datos patrimoniales.

Se analizan casos de campos de la conservación arqueológica y de edificaciones históricas, con algunos casos emblemáticos para Francia y México. Con este panorama, evaluaremos el ejemplo de intervención científica de la Catedral de Notre Dame en París que, sabemos, requirió de la participación de múltiples disciplinas para su restauración, y en donde las tecnologías permitieron un proceso de intervención ejemplar. Asimismo, se plantea el estudio con equipos de análisis del subsuelo en sitios de la Ciudad de México, Uxmal, Labná, Palenque y Puebla, que permiten el conocimiento del espacio y del potencial existente bajo el suelo, con técnicas no invasivas pero que arrojan datos precisos de la zona de desplante. En la tercera ponencia, se abordará el estudio de la zona maya Puuc, haciendo énfasis en Uxmal, con un proyecto de tecnología que incorpora diferentes análisis computacionales, que permiten generar modelos tridimensionales para el estudio de los sitios arqueológicos. Finalmente, se cierran los trabajos de la mesa con un proyecto submarino también en México, donde se aprovechan las herramientas tecnológicas para registrar y mapear vestigios arqueológicos de elementos culturales y naufragios, permitiendo sacar a la luz, y a la superficie, información crucial de zonas bajo las costas.

Con los trabajos de esta mesa, que lleva por título precisamente el nombre del presente coloquio, se logra una evaluación de diferentes métodos y técnicas que tienen una amplia gama de posibilidades en la prospección, evaluación, análisis y eficiencia en la toma de decisiones, para los equipos de especialistas que participan en la conservación del patrimonio cultural. En muchos casos, los resultados permiten tener un conocimiento profundo y a distancia, del elemento patrimonial, sin afectar o alterar sus condiciones al ser procedimientos poco invasivos. Asimismo, la recopilación de información en tiempo

real, permite contar con bancos de datos que se agrupan, clasifican y comparan estadísticamente, con evaluaciones periódicas del comportamiento del elemento construido, con una posible prospección de su evolución en diferentes escenarios climáticos y antropológicos, inclusive.

Conclusiones de la Mesa 3

El maestro Manuel Villarruel cerró la mesa resaltando la potencia del uso de la tecnología para ampliar los límites de la conservación, integrando desde catedrales como Notre Dame hasta cuevas sumergidas. Señaló la necesidad de mantener el enfoque multidisciplinario e interinstitucional como principio rector en la protección del patrimonio cultural.

Por ejemplo, lo expuesto en el caso del siniestro de Notre Dame, evidenció la transformación del sitio en un laboratorio científico, creando un ecosistema digital que integra información arquitectónica, estructural, emocional y material; de este proyecto se destacó la digitalización masiva (fotogrametría, escaneo 3D, datos multiespectrales), el uso de una plataforma colaborativa para compartir datos, la integración de modelos 3D para monitorear el estado antes, durante y después del siniestro, y el desarrollo de una base de datos semántica para vincular objetos materiales con conocimiento científico. Este esfuerzo interdisciplinario se convirtió en un modelo replicable para otros patrimonios mundiales.

En el caso de la ponencia sobre estudios geofísicos en la conservación patrimonial, se mostró cómo se emplean los métodos de georradar y resistividad eléctrica en el estudio no invasivo de estructuras arqueológicas y monumentos históricos. Se describieron casos aplicados en murales, monumentos virreinales, caminos coloniales, sistemas hidráulicos y estructuras ocultas. Estos métodos permiten hacer diagnósticos sin daño, identificar vacíos, fracturas o materiales diferenciados, a la vez que se combinan para optimizar la interpretación del subsuelo y estructuras internas.

En la tercera ponencia sobre la digitalización del patrimonio del Puuc, en la zona maya y desde la zona arqueológica de Uxmal, los arqueólogos presentaron el registro digital avanzado de arquitectura y paisaje de la región Puuc. Entre sus principales estrategias están el uso del LiDAR para detectar estructuras cubiertas por vegetación, la implementación de una plataforma digital compartida para registrar, analizar y monitorear; el uso de estas herramientas para la planificación de limpieza con métricas específicas para optimizar recursos e, incluso, la prospección de rutas mayas perdidas a través de vestigios de sacbés.

En la última ponencia, se presentaron los avances del INAH en el registro tridimensional del patrimonio subacuático con varios casos prácticos de naufragios, contextos rituales prehispánicos, cuevas sumergidas o cenotes. Se evidencia que la fotogrametría permitió la documentación con alta precisión de estructuras sumergidas, la generación de modelos 3D navegables, el monitoreo de deterioros y la difusión mediante la visualización digital.

Con las propuestas de usos tecnológicos en casos recientes para la conservación del patrimonio cultural, se destacan las siguientes coincidencias: que la tecnología es una

herramienta esencial para documentar, preservar y gestionar el patrimonio; la necesaria interdisciplinariedad como eje fundamental en los procesos de conservación, particularmente para el aprovechamiento de herramientas tecnológicas; y la importancia de la colaboración internacional e intercultural, para sumar experiencias científicas con los métodos usados en diferentes contextos culturales.

Es claro que el uso de tecnologías no sólo enriquece la documentación, sino también fortalece la toma de decisiones, generando mejores estrategias de conservación en tiempo real para el patrimonio cultural de las naciones.

Moderador: **Mtro. Manuel Villarruel Vázquez**

Notre Dame de París: una catedral de datos digitales y conocimientos multidisciplinarios para las ciencias del patrimonio cultural

Dr. Livio de Luca

Introducción

El incendio que devastó la Catedral de Notre Dame de París el 15 de abril de 2019, marcó un capítulo doloroso en su historia, pero también planteó un desafío científico extraordinario, transformando el sitio en un polo de investigación interdisciplinaria.

La restauración generó varios desafíos para las ciencias. Los investigadores contribuyeron a recuperar conocimientos sobre la arquitectura y los materiales de la catedral, mediante el análisis de los restos. Las técnicas de modelado permitieron evaluar su integridad física y su entorno sensorial, mientras que las ciencias sociales se centraron en captar el vínculo emocional que la sociedad mantiene con este emblemático monumento.

El proyecto, coordinado por el Centro Nacional para la Investigación Científica de Francia (CNRS, por sus siglas en francés) y el Ministerio de Cultura francés, ofreció un acceso sin precedentes a los materiales y datos técnicos. Reunió a 175 investigadores de más de 50 unidades de investigación, organizados en nueve grupos temáticos: madera y carpintería, metal, piedra y mortero, vidrieras, decoración, estructura, acústica, emociones patrimoniales e información digital.

El proyecto avanzó junto con la restauración, conciliando la reconstrucción urgente con los objetivos científicos, a mediano y largo plazo, e introdujo nuevas formas de trabajar en un mismo objeto, especialmente en la era digital.

Una transformación digital de las ciencias del patrimonio

En los últimos 30 años, las ciencias del patrimonio han experimentado una profunda transformación digital, con dos grandes avances.

En primer lugar, lo que comenzó con las bibliotecas digitales se extendió a la digitalización n-dimensional, integrando imágenes multimodales y multiespectrales.

En segundo lugar, la investigación ha pasado de esfuerzos aislados y específicos para cada disciplina, a un enfoque más colaborativo e interdisciplinario.

Cuatro lagunas por cubrir

Sin embargo, la relación entre ciencia y datos en los estudios multidisciplinarios revela cuatro desafíos principales en el modelado computacional y la digitalización:

- Una discrepancia semántica: aunque se han logrado avances significativos en la digitalización, los datos siguen estando fragmentados y sin interpretar. ¿Cómo transformar enormes volúmenes de datos brutos en conocimientos enormemente enriquecidos en el plano semántico?
- Una brecha de memoria: a pesar de los avances en la agregación de datos, memorizar protocolos de investigación implícitos y la experiencia individual sigue siendo difícil. ¿Cómo preservar estos elementos esenciales que caracterizan la naturaleza misma de nuestro trabajo?
- Una discrepancia de correlación de datos: somos capaces de recopilar observaciones multitemáticas y representaciones multidimensionales, pero carecemos de sistemas autónomos para correlacionar estos datos a través de diferentes dimensiones, con el fin de obtener un análisis integrado.
- Una brecha tecnológica: aunque hoy en día podemos integrar texto, imágenes, sonidos y datos 3D en entornos colaborativos, el desafío sigue siendo encontrar un equilibrio entre la experiencia humana y la asistencia computacional para garantizar un análisis relevante.

Para colmar esas lagunas, participamos plenamente en este proyecto haciendo hincapié en la producción de datos y la colaboración interdisciplinaria. Así, nuestra hipótesis es que el digital puede desempeñar el papel de tejido conectivo, integrando las disciplinas en este esfuerzo colectivo.

Nuestro objetivo era construir un ecosistema digital, un sistema socio-técnico que conectara las características físicas de la catedral con los datos y el conocimiento generado a su alrededor.

Una metodología en dos fases

Para lograrlo, desarrollamos una metodología en dos fases.

La primera fase tuvo como objetivo producir datos semánticamente enriquecidos, documentando todo el proceso: desde las preguntas de investigación hasta la producción de datos, pasando por la creación de conocimientos. Imaginemos un equipo estudiando el arco de la nave: recoge elementos, selecciona algunos de ellos, analiza sus características, realiza simulaciones numéricas de su estado inicial, luego realiza un reensamblaje físico. En cada etapa, trazamos digitalmente el recorrido de los participantes en la construcción del conocimiento colectivo.

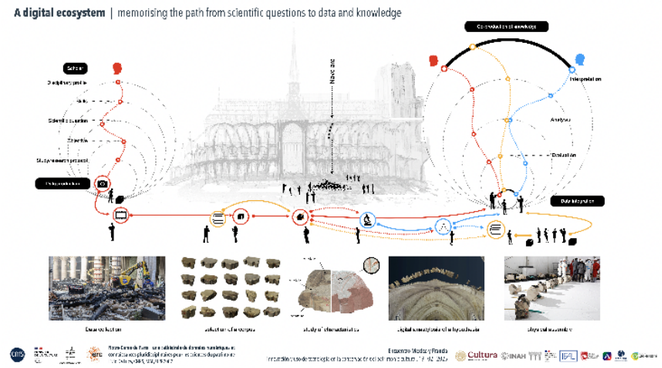


Figura 1. La primera fase de la metodología. Fuente: Elaboración propia.

La segunda fase se centró en las perspectivas del análisis de los datos producidos. Tomamos, por ejemplo, un modelo 3D de una viga para estudiar su comportamiento mecánico: está asociado a un registro gráfico que sirve para la documentación histórica; existe bajo varios estados temporales, antes y después del incendio; incluye fragmentos estudiados para la datación de la madera, así como un clavo analizado para la clasificación del hierro forjado. Nuestro objetivo fue explorar los vínculos entre objetos materiales y objetos de conocimiento, identificando puntos de convergencia entre disciplinas. El digital nos permitió cruzar las dimensiones de la forma, del espacio, del tiempo y del conocimiento.

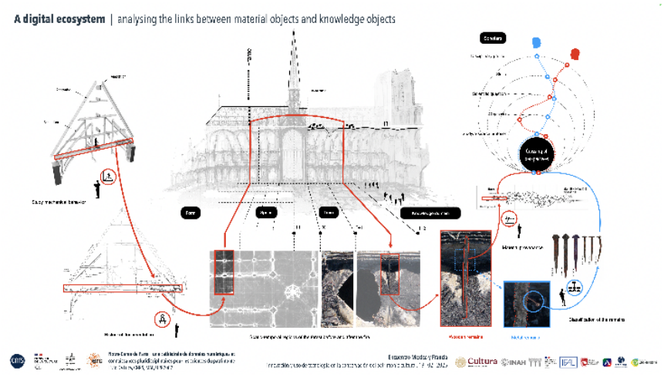


Figura 2. La segunda fase de la metodología. Fuente: Elaboración propia.

Una plataforma digital para la centralización y el enriquecimiento de datos

En 2019, iniciamos la integración de una plataforma de *software* para centralizar, enriquecer y espacializar diversos conjuntos de datos, reuniendo a investigadores franceses e internacionales especializados en la digitalización del patrimonio.

Nuestro objetivo era unificar *software* abierto y reutilizable de diferentes laboratorios en una plataforma totalmente web, capaz de gestionar todo el ciclo de vida de los datos, desde la ingesta hasta la visualización en 2D, 3D e, incluso, 4D.

Esta plataforma también soporta los pasos clave del enriquecimiento semántico, incluyendo la definición de esquemas de metadatos, el manejo de vocabularios y las anotaciones semánticas.

Una documentación evolutiva de la catedral

Los recursos digitales de nuestra plataforma abarcan una amplia gama de estados temporales y tipos de datos relacionados con la catedral, y siguen creciendo.

En un primer momento se recogieron datos de instituciones culturales, laboratorios y empresas, con un fuerte apoyo de las autoridades públicas, que reconocieron la necesidad de alinear la restauración con el proyecto científico.

Estos datos incluyeron importantes colecciones de fotografías, registros, dibujos y archivos que documentan el estado de la catedral. Paralelamente, el proyecto científico generó nuevos datos sobre materiales, estructura, acústica y antropología.

Un enfoque basado en las relaciones entre objetos, conocimientos y prácticas

Para aprovechar esta información, colaboramos estrechamente con los productores de datos a fin de definir las relaciones entre objetos materiales, áreas de conocimiento y objetivos de investigación.

La tabla que aparece en pantalla ilustra cómo organizamos nuestro trabajo colaborativo. En lugar de simplemente archivar textos o dibujos, construimos un corpus profundamente ligado a los contextos sociales que lo generan.

Esto incluyó datos de restauración, como diagnósticos realizados por arquitectos, junto con investigaciones sobre materiales.

Por ejemplo, los investigadores analizaron las técnicas medievales de construcción en madera, estudiando cómo y cuándo se utilizaron, y conservaron la madera y el metal. Otros estudiaron la cronología de los vestigios estructurales, combinando arqueología, física, química e ingeniería.

Mientras que algunos trabajos respondían a necesidades urgentes y concretas de restauración, como la evaluación de la integridad estructural, otros exploraron problemáticas más amplias, como la comprensión del clima medieval a través del análisis de los vestigios pluriseculares.

El caso emblemático de las carpinterías

Un excelente ejemplo de este enfoque es el de las estructuras. La reconstrucción digital realizada por nuestro equipo, visible en pantalla, se basa en datos sobre su estado antes del incendio.

Este modelo integra múltiples fuentes de datos: miles de fotografías, registros tradicionales y digitales, así como restos calcinados procedentes de las bóvedas.

Lo que es particularmente interesante es que este modelo cumplió varias funciones:

- Proporcionó información a los arquitectos que trabajaron en la restauración.
- Apoyó al grupo de trabajo sobre la madera, permitiendo la identificación y digitalización de los elementos que estaban en reserva.

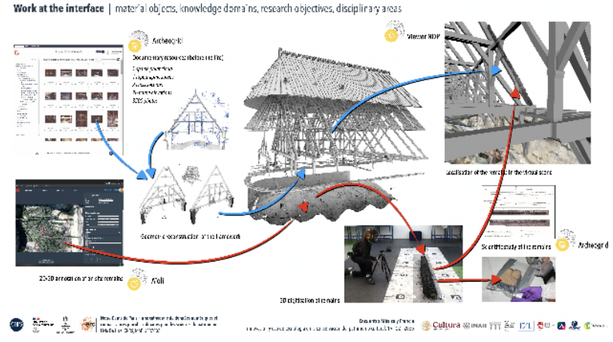


Figura 3. Un ejemplo de interconexión de actividades y datos numéricos para el estudio de las estructuras. Fuente: Elaboración propia.

Escanear el objeto físico

Un método multiescala y temporal

Ahora exploremos nuestra metodología en detalle. El primer desafío fue convertir el objeto material en datos numéricos. Esto no sólo implicaba la realización de un complejo escaneo 3D de la catedral, sino también construir un marco que permitiera integrar varias adquisiciones a diferentes escalas: desde los restos arquitectónicos, hasta el sector urbano del monumento, y en distintos momentos.

Un paso clave fue el desarrollo de una estrategia de alineación robusta para comparar estados temporales. Por ejemplo, realizamos comparaciones precisas de las bóvedas antes y después del incendio, poniendo de manifiesto las deformaciones estructurales.

También utilizamos una cámara con cable para seguir la recuperación de los restos, creando un registro cartográfico detallado de su ubicación. En los últimos meses pudimos integrar en este sistema, la digitalización del estado de la catedral tras las obras de restauración.

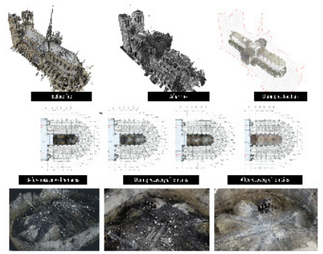


Figura 4. Proceso de digitalización multitemporal a escala arquitectónica. Fuente: Elaboración propia.

Digitalización de vestigios: un reto de análisis a gran escala

Un segundo eje principal de nuestro esfuerzo de digitalización se refiere a los restos mismos. Desarrollamos soluciones adaptadas para documentar colecciones muy extensas de elementos, hoy nos acercamos a los dos mil objetos. Guiados por preguntas científicas específicas, estos escaneos se realizaron con dispositivos diseñados específicamente para satisfacer necesidades analíticas. Mediante el prototipado de métodos automatizados de adquisición y tratamiento, garantizamos una homogeneidad geométrica y visual de los datos, aspecto esencial para los análisis comparativos, como el estudio de las huellas de herramientas, microestructuras de superficie o elementos decorativos.

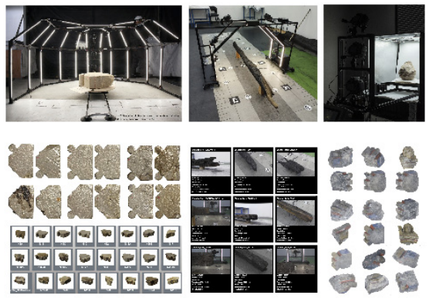


Figura 5. Solución de *hardware/software* diseñada específicamente para la digitalización de restos. Fuente: Elaboración propia.

Anotación semántica

La estructuración de las observaciones multidisciplinarias

Otro aspecto clave de nuestra investigación fue la transición de datos heterogéneos a conocimientos multidisciplinarios.

Utilizamos un enfoque de anotación 2D/3D en la plataforma Aïoli, desarrollada en nuestro laboratorio para espacializar las observaciones científicas y los datos asociados.

Este enfoque permitió organizar decenas de miles de fotografías estructuradas espacialmente, cubriendo varios estados temporales, agrupadas por temáticas, e integrando las observaciones de numerosos investigadores. El conjunto está estructurado gracias al uso de vocabularios controlados.

Una tarea importante consistió en traducir completamente el diagnóstico de evaluación de la catedral, incluyendo la cartografía de las alteraciones, las restauraciones pasadas, el análisis de los vitrales, las medidas instrumentales (radar, estratigrafía) y las propuestas de restauración formuladas por los arquitectos.

Esta metodología permitió crear un conjunto de datos multicapa, capturando el estado de la catedral después del incendio e integrando las diferentes miradas disciplinarias aplicadas al edificio.

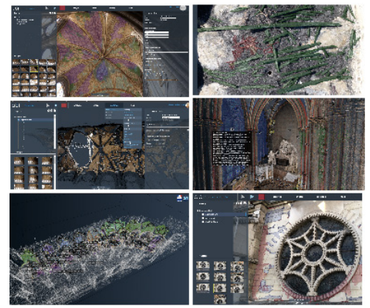


Figura 6. Ejemplos de conjuntos de anotaciones semánticas 2D/3D realizados en los conjuntos de datos fotogramétricos multitemporales. Fuente: Elaboración propia.

Integración de observaciones multidisciplinarias

Algunos ejemplos concretos de esta integración son:

- El repertorio de las marcas de tachuelas, catalogadas dentro y fuera de la catedral, incluye más de mil signos lapidarios documentados por el grupo sobre las emociones patrimoniales.
- Un centenar de muestras de policromía medieval han sido cartografiadas en los portales occidentales, con análisis estratigráfico de las capas de materiales, gracias a los trabajos del grupo sobre la decoración.
- Los restos de carpintería en el estrado del coro después del incendio fueron localizados, y secciones cortadas y estudiadas se utilizaron para la datación y procedencia por dendrocronología.
- Por último, se incorporaron cientos de anotaciones del grupo en el metal, incluyendo las juntas de plomo de las ventanas altas y los clips de las paredes de gotitas.

Es importante subrayar que cada uno de estos ejes de investigación, surgió de una cuestión científica precisa y, en algunos casos, llevó a descubrimientos importantes, por ejemplo la identificación del uso del acero en la construcción medieval de la catedral.

Del objeto al conocimiento: el caso de un clip metálico

El ejemplo de un clip metálico ilustra bien la relación entre los aspectos observables de un objeto y los conceptos que buscamos formalizar.

La posición de este clip puede ser expresada por coordenadas 3D precisas, pero también a través de un vocabulario controlado, designando su ubicación en una zona específica de Notre Dame mencionada en una fuente textual.

Además, la documentación relacionada con su estudio científico, como planos de corte y operaciones analíticas, debía estar conectada a una estructura documental que registre todo el proceso de análisis.

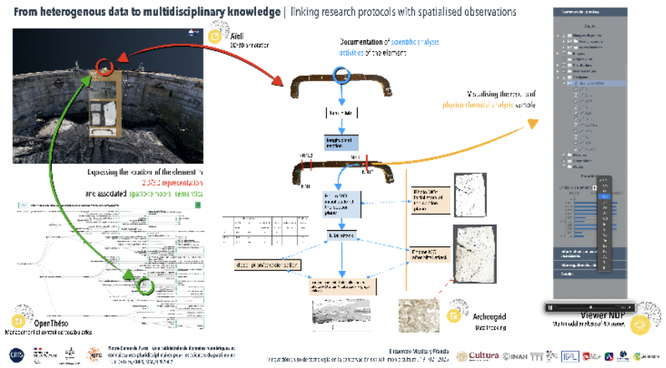


Figura 7. Un ejemplo de interconexión de datos alrededor de un objeto (localización espacial a escala de la catedral, representación geométrica a escala del vestigio, descripción del proceso de análisis científico del material). Fuente: Elaboración propia.

Explorar la complejidad de los datos

Un desafío computacional

Este ejemplo pone de manifiesto la necesidad de desarrollar enfoques innovadores para aprovechar un corpus de datos tan interconectado.

Recopilamos varios cientos de miles de fotografías, que organizamos según diferentes dimensiones: la similitud visual, analizada por algoritmos de visión por ordenador; la proximidad espacial, calculada a partir de los metadatos de tratamiento; y la distribución temporal, reflejando las sucesivas transformaciones de la catedral.

Y, como hemos visto, cada fotografía se caracteriza semánticamente por varios niveles de anotación.

Uno de los retos actuales es automatizar la clasificación de estas imágenes, explotando las correlaciones entre estas dimensiones para enriquecer la base de conocimientos.

Inteligencia artificial y anotaciones: hacia un diagnóstico asistido

Recientemente, gracias a la infraestructura de supercomputación Jean Zay, del CNRS, hemos adoptado un enfoque exploratorio de las anotaciones semánticas, integrando inteligencia artificial y aprendizaje profundo. Combinamos la segmentación automática de imágenes y el reconocimiento de patrones.

Si bien los modelos actuales pueden identificar las formas en las que han sido entrenados, nuestro desafío es aprovechar el amplio conjunto de anotaciones y vocabularios 2D/3D que hemos creado, para entrenar a estos modelos de manera específica.

Este enfoque abre perspectivas prometedoras. Por ejemplo, las anotaciones que recopilamos sobre las formas de degradación podrían, a largo plazo, constituir un recurso diagnóstico aplicable a otros monumentos, prolongando así el impacto de nuestro trabajo más allá de Notre Dame y contribuyendo a los futuros esfuerzos de restauración.

Explorar la complejidad de los vínculos entre objetos físicos y conocimientos

Esto me lleva a la última parte de esta presentación. Esperamos que este creciente corpus de datos nos permita explorar las complejas relaciones entre los objetos materiales y los objetos del conocimiento.

En la pantalla se ve un prototipo de entorno digital para explorar nuestro corpus de anotaciones multidisciplinarias. Integra, a la vez, un gráfico de relaciones semánticas y una escena 3D dinámica.

Esta herramienta es la primera interfaz que empezamos a utilizar para analizar las relaciones cruzadas dentro de nuestros datos.

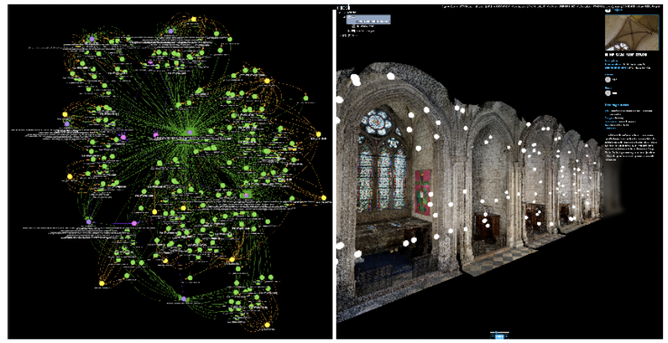


Figura 8. Prototipo de entorno digital para la explotación de las relaciones bilaterales entre una representación 3D evolutiva de una porción de espacio (aquí un conjunto de capillas de la nave) y un gráfico de relaciones semánticas entre los conceptos que lo describen. Fuente: Elaboración propia.

Un mismo espacio, miradas múltiples

Para ilustrar la magnitud de nuestra ambición, observemos la fotografía proyectada, acompañada de ramas visuales que representan las capas de observaciones e interpretaciones aplicadas a una misma porción de espacio físico.

Estas capas revelan decenas de conceptos, atributos descriptivos, términos de vocabulario y protocolos de estudio.

Este ejemplo muestra cómo un mismo espacio puede generar múltiples análisis e interpretaciones, subrayando así, la riqueza y complejidad de la investigación multidisciplinaria.

Entonces, imaginen extender este proceso a todo nuestro corpus.

A medida que avancemos en esta exploración, es probable que nos enfrentemos a grandes desafíos: encontrar el equilibrio adecuado entre la inteligencia humana, la inteligencia colectiva y la inteligencia artificial, para lograr una comprensión más profunda e integrada.

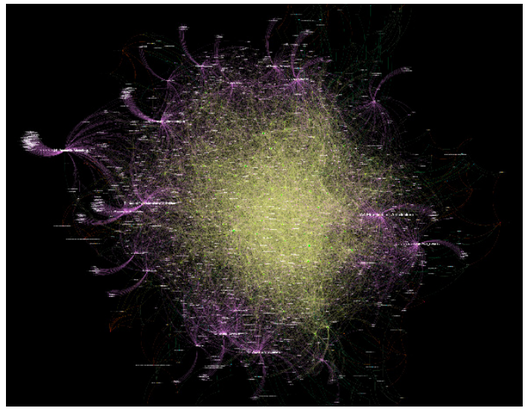


Figura 9. Visualización de los vocabularios científicos asociados al estudio de Notre Dame de París. Fuente: Elaboración propia.

Cartografiar una catedral del conocimiento

Los dejo con esta imagen que recuerda a una galaxia. Representa más de siete mil términos del vocabulario, extraídos de los artículos del número especial del *Journal of Cultural Heritage* que publicamos recientemente. Estos términos incluyen las diferentes partes de la catedral, los detalles de construcción, los materiales, los fenómenos de degradación, las problemáticas científicas, así como las metodologías, instrumentos y disciplinas involucradas.

Cada conexión refleja la perspectiva única de investigación y el recorrido singular de cada contribución.

Esta visualización pone de manifiesto el desafío de navegar y cartografiar un nuevo paisaje de datos, construido hoy en torno a un solo monumento, pero que puede extenderse a todas las ciencias del patrimonio.

Mientras que Notre Dame reabrió sus puertas el pasado mes de diciembre, nuestra búsqueda continuará hasta finales de 2027, con la ambición de materializar en el espacio digital esta "catedral del conocimiento".

Porque más allá de la organización de los datos, asumimos el desafío de cartografiar la geografía del conocimiento científico.

Nuestro objetivo es estudiar cómo diferentes disciplinas interactúan con un mismo objeto: la catedral, y medir el grado de alineación o divergencia de sus enfoques.

Al analizar estas complejas conexiones, podemos entender mejor cómo se cruzan, se superponen y, a veces, se complementan los conocimientos de diversos campos, poner de relieve sinergias fecundas y contribuir a una comprensión profunda de las dinámicas multidisciplinarias.

Fuentes bibliográficas sobre el proyecto de investigación

Revistas internacionales revisadas por pares

Abergel, V., Manuel, A., Pamart, A., Cao, I. y De Luca, L. (2023). Aïoli–Una plataforma en la nube de anotación 3D basada en la realidad para la documentación colaborativa de artefactos del patrimonio cultural. *Aplicaciones digitales en arqueología y patrimonio cultural*. Volumen 30. En *https://doi.org/10.1016/j.daach.2023.e00285 y https://hal.science/hal-04249650* (acceso abierto).

De Luca, L. (2024). A digital ecosystem for building a cathedral of collaborative data and knowledge. *Journal of Cultural Heritage*, volumen 65, pp. 206-209. En *https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.09.011 y https://hal.science/hal-04300455* (acceso abierto).

Gros, A., Guillem, A., De Luca, L., Baillieul, E., Duvocelle, B., Malavergne, O., Leroux, L. y Zimmer, T. (2023). Análisis del proceso de reconstrucción del patrimonio edificado tras un desastre en el marco del gemelo digital de Notre Dame de París. *Scientific Reports Nature*, número 13 (1), pp. 5981. En *https://doi.org/10.1038/s41598-023-32504-9* y *https://hal.science/hal-04094074v1* (acceso abierto).

Jacquot, K. y Saleri, R. (2024). Recopilación, integración e interpretación de datos heterogéneos para la reconstrucción virtual del bosque. *Journal of Cultural Heritage*, volumen 65, pp. 232-240. En *https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.06.010* y *https://hal.science/hal-04229415* (acceso abierto).

Mouaddib, M., Pamart, A., Pierrot-Deseilligny, M., Girardeau-Montaut, D. (2023). Fusión de datos 2D/3D para el análisis comparativo de las bóvedas de Notre Dame de París antes y después del incendio. *Journal of Cultural Heritage*, pp. 221-231. En *https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.06.012 y https://hal.science/hal-04152022v1* (acceso abierto).

Neroulidis, A., Pouyet, T., Tournon, S., Rousset, M., Callieri, M., Manuel, A., Abergel, V., Malavergne, O., Cao, I., Roussel, R., Granier, X., Rodier, X. y De Luca, L. (2024). Una plataforma digital para la centralización y la preservación a largo plazo de datos científicos multidisciplinarios. *Journal of Cultural Heritage*, volumen 65, pp. 210-220. En *https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.09.016 y https://hal.science/hal-04300526* (acceso abierto).

Pamart, A., De Luca, L. y Véron, P. (2022). Un sistema enriquecido con metadatos para la documentación de estudios de imágenes digitales multimodales. *Studies in Digital Heritage*, número 6(1), pp. 1-24. En *https://doi.org/10.14434/sdh.v6i1.33767* y *https://hal.science/hal-03844472/* (acceso abierto).

Capítulos de libros

Baillieul, E., Gallet, Y., Gros, A., Guillem, A., Hartmann-Virnich, A., Mechling, J., Moulis, C., Nouzeran, D., Phalip, B. y Arnaud Ybert. La mise en oeuvre des élévations et des voûtes de Notre-Dame de París: bilan des recherches et des protocoles en cours. *Actes du colloque Pierre a Pierre 3* (en inglés).

Comte, F., Pamart, A., Réby, K. y De Luca, L. (2024). Estrategias y experimentos para la digitalización masiva en 3D de los restos del incendio de Notre Dame de París. Actas del taller 3D-ARCH 2024: "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures". *The International Archives of the Photogrammetry*. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-2/W4-2024. En *https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVIII-2-W4-2024/127/2024/*

De Luca, L. (2020). Hacia la digitalización en 3D del patrimonio arquitectónico: el Proyecto "Notre Dame de París" Gemelos Digitales. *En las actas del segundo taller sobre estructuración y comprensión de los contenidos multimedia (SUMAC'20)*. Association for Computing Machinery, New York, USA, pp. 3-4. En *https://doi.org/10.1145/3423323.3423415*

De Luca, L., Hannoun, J., Willot, L. (2024). "Une cathédrale de données numériques et connaissances pluridisciplinaires. Supports des présentations, CNRS, HAL. En https://ndame2024.sciences-conf.org/browse/session?lang=en y https://sciences.hal.science/NDAME2024/

Dillmann P., Liévaux P., Magnien A., Regert M., De Luca L. (2024). Notre Dame de París: un sitio científico multidisciplinario. *Journal of Cultural Heritage*, edición especial, volumen 65. En https://*www.sciencedirect.com/journal/journal-of-cultural-heritage/65/*

Dillmann, P., Liévaux, P., De Luca, L., Magnien, A. y Regert, M. (2024). The CNRS/MC Notre-Dame scientific worksite: an extraordinary interdisciplinary adventure. Journal of Cultural Heritage, volume 65. En https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.02.004

Gros, A., De Luca, L., Dubois, F., Véron, P. y Jacquot, K. (06/2023). Describir una hipótesis en un gráfico de conocimientos, una simulación mecánica a un hecho histórico. *Humanistica 2023,*

Association francophone des humanités numériques, Genève, Suisse. En *https://hal.science/hal-04106032* (acceso abierto).
Guillem, A., Gros, A. y De Luca, L. (06/2023). Faire parler les claveaux effondrés de la cathédrale Notre-Dame de París : Un récit fondé sur le web sémantique et les Linked Open Data. *Humanistica 2023, Association francophone des humanités numériques*, Genève, Suisse. En *https://hal.science/hal-04106101* (acceso abierto).
Guillem, A., Gros, A., Abergel, V. y De Luca, L. (10/2023). Reconstrucción más allá de la representación en Notre Dame de París, *IMEKO TC-4 Conferencia Internacional sobre Metrología para la Arqueología y el Patrimonio Cultural*, International Measurement Confederation (IMEKO), Roma, Italia. En *https://hal.science/hal-04275571*
Guillem, A., Gros, A., Réby, K., Abergel, V. y De Luca, L. (11/2023). RCC8 for CIDOC CRM: Modelado semántico de relaciones espaciales mereológicas y topológicas en Notre Dame de París. *Actas de SWODCH'23: Taller Internacional sobre diseño de web semántica y ontología para el patrimonio cultural,* Atenas, Grecia. En *https://hal.science/hal-04275714* (acceso abierto).
Guillem, A., Samuel, J., Gesquière, G., De Luca, L. y Abergel, V. (2024). *Hipótesis de reconstrucción virtual versionada: revelando trayectorias contrafácticas de los dobletes caídos de Notre Dame de París mediante razonamiento y visualización 2D/3D*. Proceedings of 20th Extended Semantic Web Conference (ESWC 2024). En *https://hal.science/ERC_N-DAME_HERITAGE/hal-04625698v1* (acceso abierto).
Guillem, A., Samuel, J., Gesquière, G., De Luca, L. y Abergel, V. (2024). *Que hablen los devotos de Notre Dame de París: Narración científica y visualización 3D de hipótesis y razonamiento de reconstrucción virtual.* Proceedings of Semantic Methods for Events and Stories (SEMMES) Workshop at ESWC 2024, mayo, Hersonissos, Grecia. En *https://hal.science/ERC_N-DAME_HERITAGE/hal-04614354v1* (acceso abierto).
Réby, K., Guillem, A. y De Luca, L. (10/2023). Segmentación semántica con modelos fundacionales para el patrimonio cultural: un estudio experimental sobre Notre Dame de París. Cuarto taller del ICCV sobre el patrimonio cultural electrónico, Computer Vision Foundation, París, Francia. En *https://doi.org/10.1109/iccvw60793.2023.00184* y *https://hal.science/hal-04275484* (acceso abierto).
Réby, K., Guillem, A., y De Luca, L. (2023). Construcción híbrida del gráfico del conocimiento y experimentos de aprendizaje profundo para los datos de Notre Dame de París. *Simposio REACH*. En *https://www.reaach.eu/symposium-2023/*
Réby, K., Guillem, A., De Luca, L. (s/f). Construcción híbrida del gráfico del conocimiento y experimentos de aprendizaje profundo para los datos de Notre Dame de París. En Giordano, A., Russo, M., Spallone, R. (Eds). Avances en la representación. *Innovaciones digitales en arquitectura, ingeniería y construcción*. Springer Cham. En *https://doi.org/10.1007/978-3-031-62963-1_28*
Roussel, R. y De Luca, L. (2023). Un enfoque para construir un informe digital completo de la Catedral de Notre Dame después del incendio, utilizando la plataforma Aïoli. Actas de la CIPA 2023, Documentación, comprensión, preservación del patrimonio cultural. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2-2023. En *https://dx.doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1359-2023* y *https://hal.science/hal-04146083v1* (acceso abierto).
Willot, L., Vodislav, D., Gouet-Brunet, V., De Luca, L. y Manuel, A. (2023). Agrupación para el análisis y enriquecimiento del corpus de imágenes para la vigilancia espacio-temporal de sitios de restauración. En las actas del quinto taller de analySis, *Understanding and proMotion of heritAge Contents (SUMAC '23)*. Association for Computing Machinery, New York, USA, pp. 39-47. *https://doi.org/10.1145/3607542.3617353*. Lien HAL: *https://hal.science/hal-04283568v1*
Willot, L., Vodislav, D., De Luca, L. y Gouet-Brunet, V. (03/2022). Estructuración automática de colecciones fotográficas para el seguimiento espacio-temporal de sitios de restauración: declaración del problema y desafíos. ISPRS WG II/8. Noveno Taller Internacional 3D-ARCH "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", Mantua, Italia. pp. 521-528. Lien HAL : *https://hal.science/hal-03608442v2*
Willot, L., Réby, K., Manuel, A., Gouet-Brunet, V., Vodislav, D. y De Luca L. (2024). Creación de un conjunto de datos para la detección y segmentación de fenómenos de degradación en Notre Dame de París. Actas de las conferencias revisadas por pares del sexto taller de analySis, Understanding and proMotion of heritAge Contents (SUMAC '24), 5-12. Association for Computing Machinery, New York, USA. En https://doi.org/10.1145/3689094.3689473

*Fotografías/*slides*/gráficas tomadas de presentación compartida para el Encuentro por parte de Livio de Luca.

La tecnología al servicio del patrimonio: el diagnóstico a través de los métodos geofísicos

Dr. José Ortega Ramírez

Introducción

El patrimonio cultural representa la memoria y la identidad de un pueblo. Desde las majestuosas pirámides y templos de civilizaciones antiguas hasta las pinturas murales y objetos históricos que adornan museos y sitios arqueológicos, estos bienes conforman un legado invaluable. Sin embargo, su preservación requiere un esfuerzo constante, innovador y basado en evidencias científicas. La fragilidad natural de estos restos, sumada a factores de cambios climáticos, urbanísticos y a eventos extremos como huracanes, deslizamientos de tierra, vulcanismo y terremotos, hace imprescindible adoptar enfoques modernos para su conservación.

En las últimas décadas, la ciencia y la tecnología han revolucionado la manera en que entendemos, monitoreamos y protegemos nuestro patrimonio. Los métodos geofísicos que utilizan principios físicos de las ondas acústicas y electromagnéticas, el magnetismo y la electricidad, se han convertido en aliados indispensables para detectar daños internos, identificar estructuras ocultas, prevenir deterioros y planificar los trabajos de restauraciones adecuados. Estos métodos permiten explorar en profundidad, sin afectar de modo invasivo, la estructura, garantizando un diagnóstico más preciso para una conservación y/o restauración sustentable y efectiva.

En este artículo abordaremos, con algunos ejemplos, cómo estas herramientas están siendo empleadas en México por el Laboratorio de Geofísica del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) en el diagnóstico para la restauración y conservación del patrimonio cultural tangible, su funcionamiento, sus ventajas y sus limitaciones.

¿Qué son los métodos geofísicos y por qué son imprescindibles en la conservación?

A diferencia de los métodos tradicionales, basados principalmente en la inspección visual y/o excavación no intrusiva e invasiva, los métodos geofísicos que utilizamos no son invasivos ni destructivos y nos permiten identificar rasgos, materiales, oquedades y fracturas sin ninguna expresión en superficie, que de otra manera serían visibles únicamente a través de perforaciones.

En el INAH estos métodos se aplican para conocer las condiciones internas de monumentos, muros y sitios arqueológicos. La correcta selección del método depende del

problema o problemas a resolver, de las condiciones ambientales. La combinación de varias técnicas resulta especialmente efectiva, ya que cada una aporta información distinta y complementaria.

En el Laboratorio de Geofísica del INAH contamos y aplicamos varios métodos geofísicos en función del estudio requerido, entre éstos:

- El georradar (GPR, *Ground Penetrating Radar*): detecta cambios en las propiedades dieléctricas de los materiales u objetos analizados.
- La resistividad eléctrica: identifica zonas con diferente humedad (conductividad), cavidades y/o muros (resistividad).
- La magnetometría: identifica restos metálicos enterrados o estructurales.

Este trío de técnicas ha demostrado ser fundamental para anticipar daños, planear restauraciones y reducir los riesgos de pérdida irreversible del patrimonio cultural.

¿Cómo funcionan estos métodos? Explicaciones sencillas y ejemplos reales

La radiografía invisible: el georradar (GPR)

El radar de penetración terrestre (GPR) es un método geofísico que utiliza ondas electromagnéticas de alta frecuencia, para detectar discontinuidades en el subsuelo. Funciona mediante la emisión de pulsos desde una antena emisora, los cuales se reflejan al encontrar cambios en las propiedades dieléctricas de los materiales (por ejemplo, entre tierra y piedra o vacío), y son registrados en otra antena receptora y almacenados en una memoria de masa para su posterior tratamiento o filtrado (Figura 1).

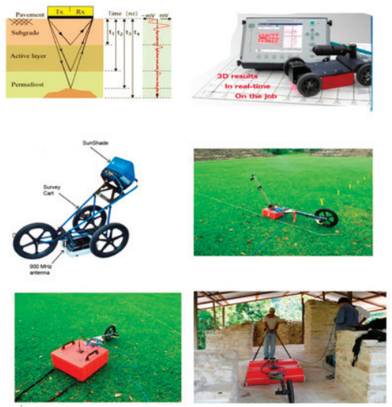


Figura 1. A la derecha, en color rojo, pulso electromagnético con reflexiones en los contactos entre capas. Georradar y antenas de 1500/1600 MHz, 900 MHz, 400MHz, 200 MHz y 100 MHz. Fotografías del autor. Elaboración propia: José Ortega Ramírez, a partir de materiales obtenidos en el levantamiento de Palenque, Chis. y El Tajín, Ver. de los trabajos en el INAH. Año de toma: 2010.

En estudios de arquitectura histórica y arqueología, el GPR permite identificar muros enterrados, cimentaciones, pavimentos, cámaras ocultas y otras estructuras, sin intervenir físicamente el sitio, facilitando análisis estratigráficos y reconstrucciones tridimensionales con alta resolución espacial.

Por ejemplo, en las pinturas murales, catedrales, exconventos o museos, con el georradar hemos detectado áreas de humedad oculta en los muros que tenían originalmente otra función (nichos tapiados), fisuras internas que amenazaban con expandirse y zonas donde la pintura original ha sufrido desprendimientos de la capa original que la soporta. La detección temprana de estos daños podría permitir a los restauradores actuar de manera preventiva y precisa, reforzando o sellando esas áreas, en lugar de realizar restauraciones invasivas y costosas (Figura 2).



Figura 2. Ejemplos de aplicaciones: a) sondeos con la antena de 900 MHz en la entrecalle del Templo de Quetzalcóatl, Teotihuacan, Estado de México, con problemas de humedad que está dañando las esculturas; b) sondeos con antena de 900 MHz sobre un mural de Roberto Montenegro en el Centro Nacional Conservación y Registro del Patrimonio Artístico Mueble (CENCROPAM), Ciudad de México, también con problemas de humedad. Fotografía: José Ortega Ramírez. Año de toma: 2024, fotos de trabajos realizados, cuyos informes fueron entregados a los solicitantes. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Explorando lo que hay bajo tierra: tomografía de resistividad eléctrica

El método de resistividad eléctrica consiste en medir la capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica mediante la inyección de una corriente continua a través de electrodos. Las variaciones en la resistividad reflejan diferencias en la composición, humedad y compactación de los materiales enterrados. En estudios de patrimonio cultural, este método permite identificar estructuras como cimientos, muros, fosas, tumbas o cavidades, al distinguir materiales con distintas propiedades eléctricas. Es especialmente útil en contextos donde el contraste entre elementos arqueológicos y el sedimento circundante es significativo, y se aplica tanto en sitios arqueológicos como en monumentos históricos y artísticos sin necesidad de alguna intervención invasiva o destructiva.

Aunque este método originalmente es invasivo debido a que se requiere de perforaciones para que los electrodos penetren en la superficie –lo que tradicionalmente se consideraba una limitación–, en los últimos años en el INAH hemos desarrollado electrodos no invasivos (Figura 3), permitiendo el monitoreo en bienes culturales delicados sin riesgo de alteración de pisos o paredes, como museos (Michoacán), iglesias, antiguos

conventos (Xochimilco, Puebla) y en paredes (pintura mural de Roberto Montenegro en el CENCROPAM) (Figuras 3 y 3.1).

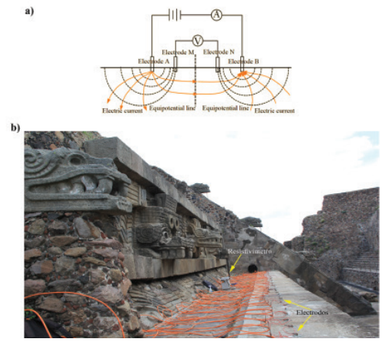


Figura 3. a) El principio del método de resistividad eléctrica; b) sondeo en la primera entrecalle del Templo de Quetzalcóatl, Teotihuacan, Estado de México. Fuente: Elaboración propia. Fotografía: José Ortega Ramírez. Año de toma: 2023. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

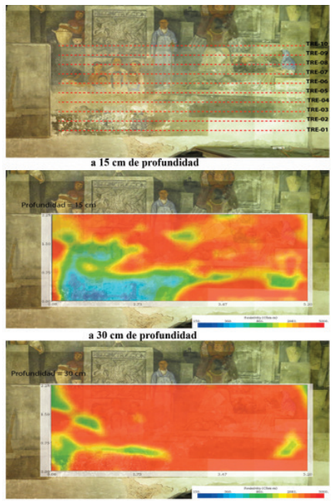


Figura 3.1. Parte del mural de Roberto Montenegro "La fiesta de la Santa Cruz", ubicado en el interior del edificio del CENCROPAM, en la Ciudad de México. En la figura superior se indican con líneas discontinuas en color rojo, la dirección, espaciamiento y número de sondeo (TRE). En medio y abajo los resultados de la interpolación de los sondeos de resistividad a diferente profundidad, los colores rojizos, las zonas secas (muy resistivas); y las azules, verdes y amarillas, las áreas húmedas (conductivas). Esto indica que la humedad no es del interior de la pared que soporta al mural, sino del interior del recinto. Crédito: José Luis Salas Corrales. Año de toma: 2025. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

La detección de metales y restos ocultos: magnetometría

El método magnetométrico, y en particular el uso de gradiómetros magnéticos, se basa en la detección de variaciones en el campo magnético terrestre causadas por anomalías en el subsuelo. Estas anomalías pueden deberse a estructuras arqueológicas (muros, hornos, fosas, caminos) que alteran la susceptibilidad magnética del terreno. El gradiómetro mide la diferencia de intensidad magnética entre dos sensores dispuestos verticalmente (Figura 4), lo que permite detectar cambios sutiles con alta sensibilidad y resolución espacial. En el contexto del patrimonio cultural, este método es especialmente útil para la prospección no invasiva de sitios arqueológicos, localización de restos enterrados, delimitación de asentamientos y planificación de excavaciones, todo sin alterar el entorno ni los vestigios.



Figura 4. Prospección geofísica con magnetómetro en el sitio arqueológico de Xochicalco, Morelos, con el propósito de detectar cavidades y vestigios de origen antrópico. Fotografía: José Ortega Ramírez. Año de toma: 2025, forma parte del informe entregado al Director del Sitio Arqueológico. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Casos y ejemplos relevantes en México: tecnología en acción para salvar nuestro patrimonio

A continuación, presentamos algunos casos destacados en los que estas técnicas demostraron ser verdaderas aliadas en el diagnóstico, previos trabajos de conservación y protección del patrimonio cultural en México, en diferentes escalas y contextos, el primero publicado en la revista *Journal of Cultural Heritage*, titulado "High frequency GPR in the diagnosis of the state of alteration of a mural by Diego Rivera previous restoration", de Ortega-Ramírez, Bano y Villa Alvarado (2022, 55, 228-236). Y el segundo, en el *Journal of Applied Geophysics* titulado "Application of non-invasive geophysical methods (GPR and ERT) to locate the ancient foundations of the first cathedral of Puebla, Mexico. A case study", de Ortega-Ramírez, Bano, Cordero-Arce, Villa-Alvarado y Chávez Fraga (2020).

1. Así se salvó un mural en la Ciudad de México

GPR en la preservación de murales históricos en la Ciudad de México

El GPR es reconocido por su eficacia en la arqueología no destructiva y en general en la gestión del patrimonio cultural, al proporcionar imágenes internas de estructuras sin dañarlas. Nuestra investigación se focalizó en el mural "Salida de la mina", de Diego Rivera (Figura 5), afectado por una fisura recurrente, utilizando una antena de alta frecuencia (2600 MHz). Este mural se encuentra en el emblemático edificio de la Secretaría de Educación Pública (SEP). Los objetivos fueron:

Detectar la disposición y origen de la fisura dentro del muro.

1. Identificar la textura y estructura de los materiales de construcción.
2. Establecer la relación entre las características internas y la preservación del mural, especialmente ante eventos sísmicos.
3. Investigar la presencia de una botella que, según la leyenda, contiene un controvertido poema escrito por Rivera.



Figura 5. a) Al fondo, el mural "Salida de la mina". b) Preparación para los sondeos sobre el mural con georradar y antena de 2600 MHz. Fotografía: José Ortega Ramírez. Año de toma: 2018. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Las conclusiones del estudio demuestran el gran potencial del GPR de alta frecuencia (2.6 GHz) para inspecciones no invasivas de murales. Los resultados revelaron:

La presencia de un objeto tubular metálico a aproximadamente 7-8 centímetros de profundidad, cuyas reflexiones y polaridad (invertida respecto al pulso incidente) coinciden con modelos sintéticos de tubos metálicos. Se sugiere que esta antigua tubería es la causa de las fisuras recurrentes en el mural, posiblemente instalada durante la reconstrucción del edificio en el siglo XX y que también explicaría el inusual grosor de la capa de cal y arena bajo la pintura (Figura 6).

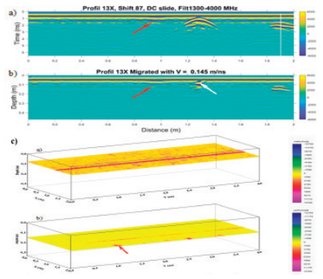


Figura 6. a) y b) Las flechas en color rojo y blanco señalan una anomalía longitudinal y en forma de hipérbole, respectivamente. c) Las mismas anomalías en tercera dimensión longitudinal (antigua tubería) y en forma de punto en color rojo. Elaboración propia: José Ortega Ramírez, a partir de materiales obtenidos en el levantamiento electromagnético de los trabajos en el INAH. Año de toma: 2021. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

La detección de una botella de vidrio de 4.6 cm de espesor incrustada en la pared. Las reflexiones de esta anomalía coinciden en polaridad con un modelo sintético de una botella de vidrio, confirmando su existencia. Sin embargo, el estudio no puede determinar si esta botella contiene el famoso poema (Figura 7).



Figura 7. a) La posición espacial de la anomalía correspondiente a una antigua tubería a 7-8 centímetros de profundidad, causante de la fisura visible en superficie; y b) señalada por la flecha en color rojo, la posición de la botella de vidrio a la SEP. Fotografía: José Ortega Ramírez. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

En resumen, el GPR se confirma como una herramienta valiosa para comprender las causas del deterioro de murales en edificios históricos, facilitando su restauración y conservación.

2. Protección de sitios históricos en zonas de riesgo y áreas urbanas

Se presentan los hallazgos de una investigación geofísica que emplea el GPR y la tomografía de resistividad eléctrica (ERT) dentro del atrio de la Catedral de Puebla, México. El objetivo principal fue resolver controversias históricas en torno a la ubicación precisa del templo original, conocido como la catedral vieja. Se consideraron dos hipótesis principales con respecto a sus cimientos: su ubicación en el lado noroeste y su localización en la parte noreste de la catedral actual. Se realizaron estudios de GPR utilizando antenas de 200 MHz y 400 MHz, complementados con un estudio de ERT. Los resultados integrados identificaron y localizaron con éxito los restos de la catedral vieja en la parte noroeste del atrio (Figura 8).

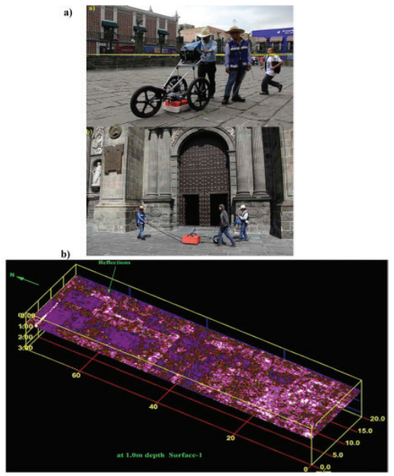


Figura 8. a) Sondeos con las antenas de 400 MHz y 200 MHz en el atrio, enfrente de la puerta principal de la catedral. b) Resultados en tercera dimensión a un metro de profundidad, en donde se observa una geometría correspondiente a los cimientos de la antigua catedral, en colores claros. Crédito: Fotografías del autor. Elaboración propia: José Ortega Ramírez a partir de materiales obtenidos en el levantamiento de los trabajos en el INAH y a partir del procesamiento de señales electromagnéticas. Su creación es *copyright* del autor. Año de toma: 2018. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Además, se detectaron otras anomalías subterráneas consistentes con la existencia efímera de un templo anterior más pequeño, el "Sagrario". Este estudio demuestra que el GPR es un método particularmente adecuado y no dañino para investigar restos subterráneos sospechosos, protegiendo eficazmente el patrimonio cultural (Figura 9).

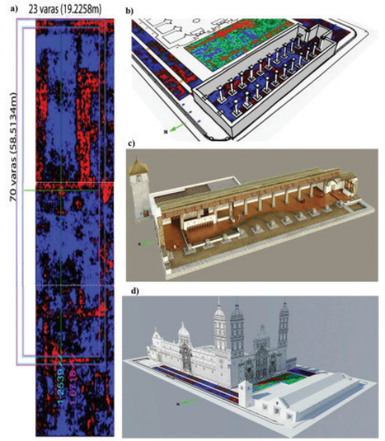


Figura 9. a) Resultados en planta a un metro de profundidad, los colores rojizos indican materiales reflectados (muros y/o cimentaciones) y distancias en "varas" y su equivalente en metros, de acuerdo con fuentes históricas; b) con base en la figura a), reconstrucción del inmueble; c) render de la antigua o primera catedral; y d) maqueta. Elaboración: Cristofer Chávez Fraga, a partir de materiales obtenidos en el levantamiento y del procesamiento de las señales electromagnéticas (georradar) de los trabajos en el INAH. Año de modelo virtual: 2020. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

En ciudades coloniales como Puebla, estos métodos geofísicos han ayudado en el diagnóstico del estado de muros y cimentaciones, así como en la identificación de fisuras y fracturas en iglesias y exconventos. Con estos datos, los arquitectos y restauradores han realizado reforzamientos específicos, gestionando de manera eficiente los recursos y priorizando intervenciones en zonas más vulnerables.

Esta estrategia ha permitido reducir riesgos durante obras de mantenimiento y evitar daños accidentales en componentes históricos de gran valor.

Ventajas y limitaciones de las tecnologías en la conservación del patrimonio

Ventajas y limitaciones de los métodos geofísicos

Ventajas:

- No invasividad: La principal fortaleza de estos métodos es su carácter no destructivo. Pueden explorar estructuras antiguas, murales, cimientos y restos enterrados sin necesidad de perforar, remover o alterar las obras.
- Alta precisión: La digitalización y el procesamiento de datos permiten detectar daños internos, fisuras, humedad y objetos metálicos, con una precisión milimétrica, facilitando un diagnóstico certero.
- Monitoreo en tiempo real: La incorporación de sensores y plataformas digitales permite seguir en tiempo real, las condiciones de las estructuras y detectar cambios que puedan llevar a un deterioro acelerado si no se atienden oportunamente.
- Planificación eficiente: La información recopilada ayuda a priorizar intervenciones, optimizar recursos y diseñar estrategias de conservación que respetan la integridad y valor de los bienes culturales.
- Documentación digital: La generación de modelos 3D, mapas y bases de datos permite guardar registros históricos y comparativos que facilitan el seguimiento a largo plazo y la divulgación.

Limitaciones:

- Costo y capacitación: La adquisición y mantenimiento de equipos avanzados y la capacitación del personal especializado aún representan desafíos importantes, sobre todo en países en vías de desarrollo.
- Interferencias externas: Como toda tecnología basada en ondas electromagnéticas, puede verse afectada por señales externas (radio, celulares, líneas eléctricas), lo que requiere un proceso cuidadoso de calibración.
- Interpretación de datos: La generación de registros requiere del análisis experto, pues las señales pueden ser complejas o ambiguas, sobre todo en estructuras con múltiples materiales o en ambientes con altas condiciones de ruido.
- Cobertura limitada: Aunque los métodos son efectivos en zonas específicas, no siempre resultan adecuados para áreas muy extensas sin definir previamente un plan de muestreo o sincronización.
- Condiciones ambientales: La humedad, la temperatura y otros factores pueden afectar la calidad de las mediciones, aunque en la actualidad se trabaja en reducir estos efectos con tecnologías más resistentes o combinación de métodos.

Retos y perspectivas futuras

El avance tecnológico en la conservación del patrimonio aún enfrenta obstáculos. Sin embargo, las proyecciones indican que la integración de nuevas herramientas potenciará aún más los resultados:

- Los automatismos permitirán analizar grandes volúmenes de datos y predecir deterioros futuros, facilitando intervenciones preventivas más efectivas y en menor tiempo, por ejemplo los métodos de *Deep Learning* y *Pattern Recognition*.
- Nuevos materiales y sensores inteligentes: La investigación en materiales con sensores integrados que puedan activarse ante condiciones adversas (humedad, movimiento, temperatura) ofrecerá respuestas inmediatas, protegiendo activos culturales con acciones automáticas.
- Tecnologías de visualización y realidad aumentada: La adopción de realidad virtual y aumentada permitirá a conservadores, investigadores y público en general, interactuar con modelos digitales 3D, entender el estado de los bienes y planear acciones de manera participativa y educativa.
- Colaboración global: La interoperabilidad entre diferentes instituciones, países y plataformas de datos facilitará el intercambio de información y mejores prácticas, fortaleciendo la protección del patrimonio mundial.

A pesar de estos avances, persisten desafíos en financiamiento, formación de recursos humanos especializados y en regular las acciones para proteger los sitios sin caer en intervenciones excesivamente intrusivas. La conservación inteligente requiere un equilibrio entre tecnología, sensibilidad cultural y gestión ética.

Conclusión

Los métodos geofísicos y las tecnologías digitales están transformando la manera en que comprendemos y protegemos nuestro patrimonio cultural. Desde la detección temprana de fisuras en murales, hasta la exploración de estructuras enterradas sin ninguna indicación en superficie. Estas herramientas aportan un diagnóstico preciso indispensable para una conservación preventiva que prolongue la vida del patrimonio cultural tangible.

Los resultados de los ejemplos presentados muestran el éxito que puede alcanzarse cuando la ciencia, la innovación y la valorativa cultural trabajan juntas. Gracias a estas técnicas hemos avanzado en la protección de sitios que aún guardan secretos, permitiendo su estudio y conservación en condiciones que respetan su valor y fragilidad.

El futuro de la conservación patrimonial es prometedor, con una tendencia clara hacia la integración de la inteligencia artificial, sensores inteligentes y plataformas digitales colaborativas. Así, la ciencia ofrece un aliado poderoso para que las obras del pasado sigan siendo testimonio vivo de nuestra identidad y cultura.

Invertir en innovación, capacitación y cooperación internacional es la clave para que esta alianza entre tecnología y patrimonio siga dando frutos, asegurando un legado incontrastable para las generaciones venideras.

Digitalizando el Puuc

Arqlgo. José G. Huchim Herrera
Arqlgo. Héctor Emmanuel Cauich

Introducción

El patrimonio arqueológico es uno de los mayores tesoros culturales de México y del mundo. Formado por monumentos, sitios y restos de civilizaciones que habitaron nuestro territorio hace siglos, constituye un testimonio invaluable de nuestra historia, identidad y creatividad. Sin embargo, estos bienes están sometidos a múltiples amenazas que ponen en riesgo su integridad y conservación. La humedad, el clima, las intervenciones humanas, la contaminación, los huracanes y el crecimiento urbano representan desafíos constantes.

En respuesta, científicos, arqueólogos y restauradores han comenzado a integrar tecnologías de punta en sus metodologías de trabajo. La innovación digital, la sensórica avanzada y las técnicas de registro tridimensional están permitiendo intervenir de forma más efectiva y sustentable, promoviendo una conservación preventiva y un monitoreo continuo que reducen drásticamente los riesgos de pérdida irreversible.

Este artículo presenta un ejemplo palpable de tales avances, centrado en la región del Puuc, en Yucatán, donde un proyecto regional de registro y conservación aplicado emplea las herramientas más modernas para comprender y proteger uno de los patrimonios más ricos del México prehispánico.

La región del Puuc: un patrimonio de riqueza y vulnerabilidad

Situada en el suroeste del estado de Yucatán, la región del Puuc es un mosaico de ciudades antiguas, edificios religiosos y suntuosos palacios decorados con mosaicos de piedra caliza y bajorrelieves que reflejan una cultura maya floreciente entre los siglos VII y X d.C.

La densidad de sitios arqueológicos en esta zona supera los 350, muchos de los cuales aún permanecen en estado de exploración y estudio. Sitios emblemáticos como Uxmal, Labna, Sayil y Kabah (Figura 1) han sido declarados Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, no sólo por su excepcional valor histórico y artístico, sino también por su importancia para entender las redes comerciales, religiosas y políticas de la antigua civilización maya.



Figura 1. Mapa con la ubicación de los sitios abiertos al público en la región del Puuc. Fuente: José G. Huchim Herrera y Héctor Emmanuel Cauich a partir de materiales obtenidos en el levantamiento con GPS de los trabajos en el INAH. Año de toma: 2023. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/altqTAJCN3w?si=ocUlkCwGs5bUVAMs&t=3209*

No obstante, su ubicación en un entorno tropical y húmedo, sumado a la creciente presencia humana y el impacto climático, los hace particularmente vulnerables. La humedad, en particular, ha demostrado ser uno de los agentes más dañinos para la piedra caliza, facilitando su deterioro, fisuras y pérdida de detalles decorativos. La presencia de lluvias intensas y huracanes, propios del clima de la región, acentúan aún más las amenazas.

La tecnología al corazón del proceso de conservación: una mirada innovadora

Históricamente, la conservación y exploración de soportes arqueológicos dependían de la inspección visual, las excavaciones y las mediciones manuales. Sin embargo, en las últimas décadas el avance tecnológico ha permitido transformar esas prácticas.

Registro digital y modelado 3D con escáner láser y fotogrametría

Una de las herramientas más revolucionarias en la conservación moderna ha sido el uso del escáner láser terrestre y la fotogrametría con drones. Estos sistemas generan nubes de puntos con una precisión milimétrica, que se convierten en modelos digitales en alta resolución. Con estos datos, los investigadores logran crear planos y visualizaciones en 3D, lo cual facilita el análisis de cambios estructurales y el seguimiento de deterioros a lo largo del tiempo.

En Uxmal y otros sitios, el escaneo tridimensional ha permitido detectar fisuras internas, desprendimientos, zonas con pérdidas de material decorativo y desplazamientos en las estructuras, información fundamental para planear intervenciones precisas.

Prospección con LiDAR y detección de vestigios ocultos

El *Light Detection and Ranging* (LiDAR), que funciona a través de vuelos con láser desde aviones o drones, permite obtener mapas de muy alta resolución en zonas con densa vegetación. Bajo la cobertura de árboles y plantas, el LiDAR revela caminos antiguos, cimientos ocultos, plazas, canales de agua y otros vestigios de una extensión que sería imposible detectar visualmente o con métodos convencionales.

En la región del Puuc, el uso de LiDAR con drones ha sido determinante para identificar restos de calles, terrazas y pequeños edificios que estaban cubiertos por la selva y el follaje, ayuda para construir representaciones en 3D precisas y detalladas, facilitando la planificación de futuras excavaciones y restauraciones, además de permitir un monitoreo a largo plazo que detecte cambios estructurales o ambientales en el tiempo. La posibilidad de mapear áreas extensas rápidamente y con alta resolución ha sido un cambio radical en la arqueología de la región, ya que permite descubrir estructuras y conexiones que permanecieron invisibles durante siglos. Esto ha llevado a redistribuir recursos y esfuerzos, concentrando la atención en las zonas de mayor interés y priorizando acciones de conservación y protección en áreas identificadas como particularmente vulnerables o en riesgo.

En especial, del *sakbej* (camino blanco en maya) que conecta las ciudades de Uxmal y Kabah (Figura 2). A lo largo de los 18 kilómetros de extensión de este camino se encuentran otros asentamientos como Nohpat y Sacbé, los cuales muy probablemente fueron piezas clave para la ciudad de Uxmal. A pesar del conocimiento de este camino desde hace varias décadas y de que algunos investigadores han realizado algunos croquis y planos de áreas que se encuentran en él, el proyecto denominado "Digitalizando el Puuc" es el primero en registrar cerca de 800 hectáreas de estructuras y asentamientos adyacentes (Figura 3).

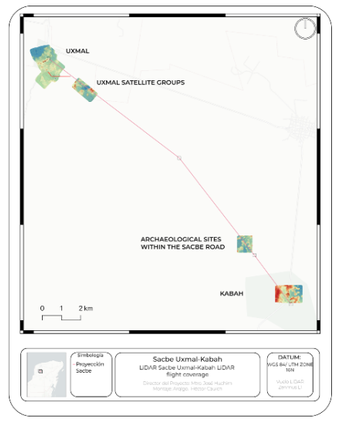


Figura 2. Plano con la proyección del *sakbej* Uxmal-Kabah de acuerdo con los datos obtenidos en campo por Huchim y Toscano, en 2015. Se incluyen el Modelo Digital de Elevación (DEM) de los sitios de Uxmal y sus grupos satélite, Sacbé y Kabah. Fuente: José G. Huchim Herrera y Héctor Emmanuel Cauich a partir de materiales obtenidos en el levantamiento LiDAR de los trabajos en el INAH. Año de toma: 2024. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/altqTAJCN3w?si=T6ss8zUuoGbQu0GX&t=3752*

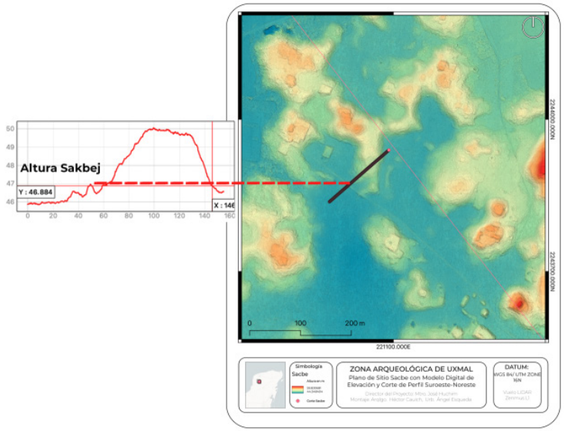


Figura 3. Plano del sitio Sacbé con modelo digital de elevación y corte de perfil suroeste-noroeste con la altura del *sakbej*. Fuente: José G. Huchim Herrera y Héctor Emmanuel Cauich a partir de materiales obtenidos en el levantamiento LiDAR de los trabajos en el INAH. Año de toma: 2024. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/altqTAJCN3w?si=EAgWx6Uw-cihGQ96Y&t=3842*

Monitoreo continuo y análisis térmico en las estructuras

El clima de la región del Puuc favorece los procesos de deterioro acelerado. El monitoreo de la temperatura de los edificios mediante vuelos térmicos ha permitido detectar incrementos de humedad anormales que, si no se controlan, pueden llegar a dañar la piedra caliza, facilitar el crecimiento de flora dañina y favorecer la formación de sales que deterioran la estructura.

Adicionalmente, se ha logrado detectar mediante las imágenes térmicas, la manera en la que influyen los procesos de restauración en el incremento de la acumulación térmica en los edificios. En el caso de las partes consolidadas con cemento, correspondiente a trabajos realizados previo a 1990, se observa un incremento en la acumulación térmica a diferencia de las consolidaciones con cal, registrándose una diferencia mayor a 15°C entre ellos (Figura 4).

La conservación preventiva basada en datos objetivos, resulta más efectiva y menos invasiva contribuyendo, además, a reducir los costos y a extender la vida útil de los monumentos.

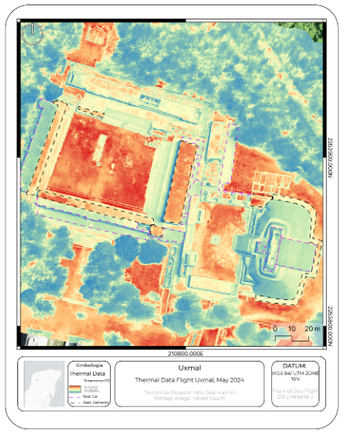


Figura 4. Plano térmico del Cuadrángulo de Pájaros y Monjas con el tipo de restauración aplicada (cemento en líneas punteadas de color negro o cal en líneas punteadas de color morado). Fuente: José G. Huchim Herrera y Héctor Emmanuel Cauich a partir de materiales obtenidos en el levantamiento con dron de los trabajos en el INAH. Año de toma: 2024. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Modelos digitales para la conservación y planeación de intervenciones

Los datos en 3D que combinan escaneo láser, fotogrametría y LiDAR, se integran en plataformas digitales que permiten realizar análisis comparativos en diferentes momentos. La creación de modelos digitales en tiempo real o en periodos largos ayuda a detectar pequeñas variaciones estructurales, como el desplazamiento de muros o desconchamientos en detalles decorativos. Estas herramientas también posibilitan simular intervenciones y evaluar su impacto antes de llevarlas a cabo físicamente.

Por ejemplo, en Uxmal y otros sitios clave, la conservación se ha planificado usando estos modelos, priorizando acciones en zonas con mayor riesgo de fractura o pérdida de detalle, y diseñando soluciones específicas que respetan la arquitectura original y garantizan su estabilidad futura.

La integración del trabajo interdisciplinario y la gestión de información

Un aspecto fundamental en estos procesos es la colaboración entre diferentes disciplinas: arqueólogos, ingenieros civiles, topógrafos, especialistas en sensores y sistemas de información geográfica (SIG). La coordinación entre estos perfiles permite un trabajo mucho más efectivo, pues cada uno aporta conocimientos específicos que enriquecen la interpretación de los datos y potencian la precisión de las acciones.

Además, toda la información generada –mapas, modelos, registros de humedad, vegetación, daños estructurales y hallazgos arqueológicos– se almacena en plataformas digitales compartidas, accesibles en línea para todos los actores involucrados. Esto favorece el control, el seguimiento y la actualización constante de las acciones de conservación.

Resultados y beneficios en la protección del patrimonio del Puuc

El empleo de estas tecnologías aportó resultados concretos en la protección y conservación de los sitios en la región del Puuc:

- Detección anticipada de daños estructurales: Los registros y monitoreos en tiempo real permiten detectar fisuras o desplazamientos en muros, antes de que se conviertan en fallas irreparables, permitiendo acciones correctivas tempranas y eficaces.
- Identificación de zonas vulnerables: Los mapas térmicos y el apoyo de datos LiDAR de estructuras enterradas ayudan a priorizar intervenciones en áreas que, por su estabilidad, requieren atención inmediata, además de reparar las que ya están en deterioro.
- Incremento en la eficacia de las restauraciones: La digitalización de los sitios y la creación de modelos en 3D permiten diseñar intervenciones precisas, minimizando impactos y respetando la integridad original de los monumentos y sitios.
- Planificación de acciones de protección y mantenimiento preventivo: La información obtenida se ha transformado en planes de manejo y conservación basados en evidencia científica, facilitando la protección a largo plazo y la difusión del valor cultural de estos sitios.

La comunidad y el patrimonio del futuro

Un pilar fundamental del éxito en la conservación moderna del patrimonio es la participación activa de las comunidades locales y el empoderamiento de los actores que habitan en las zonas de influencia de estos sitios. La capacitación en el uso de tecnologías como escáneres láser, drones, sensores térmicos y plataformas digitales, ha permitido que los propios vecinos y comunidades indígenas participen en la vigilancia y el cuidado de sus sitios ancestrales, mediante la incorporación de personal proveniente del municipio de Santa Elena para el manejo y procesamiento de equipos de registro 3D. Esto no sólo promueve la protección del patrimonio, sino que también fortalece la identidad cultural y fomenta el turismo sostenible.

Otra ventaja importante radica en que estas tecnologías, al ser de bajo impacto y altamente precisas, reducen la necesidad de intervenciones invasivas y, por lo tanto, disminuyen el daño potencial a las estructuras. Esto significa que el patrimonio se mantiene en mejores condiciones, con intervenciones que prolongan su vida útil sin alterar su carácter original ni su contexto cultural.

La importancia de la investigación y la cooperación internacional

El trabajo realizado en la región del Puuc es ejemplo de cómo la innovación en el uso de tecnologías digitales y sensoriales, puede transformar la gestión del patrimonio. Sin embargo, para afrontar desafíos globales como el cambio climático, la erosión o el crecimiento urbano, la cooperación internacional resulta imprescindible. Instituciones como el CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) en Francia, el Smithsonian en Estados Unidos, y centros de investigación en Europa y América, colaboran formalmente en intercambios de conocimientos, formación y transferencia de tecnología.

En el caso del Puuc se ha contado con la colaboración de la Universidad de Ghante (Bélgica), Universidad Politécnica y Universidad de Valencia (España).

De esta manera, el trabajo conjunto permite desarrollar soluciones más robustas, compartir buenas prácticas y optimizar recursos. La interoperabilidad de datos, el uso de plataformas abiertas y el establecimiento de estándares internacionales, facilitan que los avances tecnológicos puedan ser adoptados por diferentes regiones y contextos culturales.

Perspectivas futuras y retos

Aunque los avances en la tecnología para la conservación son prometedores, todavía enfrentamos retos importantes. La implementación de sistemas integrados de monitoreo requiere inversión y capacitación constante. La recolección, análisis y conservación de grandes volúmenes de datos, demandan infraestructura tecnológica y recursos humanos especializados. Además, la rápida expansión urbana o fenómenos como el cambio climático representan amenazas que deben abordarse con estrategias integradas y sostenibles.

En este sentido, la tendencia apunta hacia el uso de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático para hacer predicciones más precisas sobre el deterioro y la vulnerabilidad de los sitios. Asimismo, el desarrollo de nuevos materiales de restauración digitales, o tecnológicamente respaldados, puede ofrecer soluciones de conservación que respeten la autenticidad y el valor estético de los monumentos.

Por ejemplo, en algunos países ya se trabaja en sensores que, además de recopilar información, pueden activar medidas de protección automáticamente ante condiciones extremas, como el cierre de sistemas de humedad o la protección activa de estructuras ante movimientos detectados por algoritmos predictivos.

Conclusión

El trabajo realizado en la región del Puuc, en Yucatán, ejemplifica cómo la innovación tecnológica puede ser un aliado ineludible en la protección y conservación del patrimonio arqueológico. La aplicación de escáneres 3D, LiDAR, sensores ambientales, plataformas digitales de gestión de datos y monitoreo en tiempo real, ofrece ventajas inmejorables: mayor precisión, eficiencia, anticipación y respeto por la integridad original de los monumentos.

Este enfoque multidisciplinario y tecnológico tiene un impacto duradero: conserva la identidad cultural de una comunidad, permite a las futuras generaciones disfrutar, estudiar y valorar su historia, y fortalece la cooperación internacional en un compromiso global por proteger el patrimonio cultural del mundo.

El camino por recorrer es todavía largo, pero los avances aquí presentados son una clara muestra de que con innovación, compromiso y participación activa de todos los actores, podemos responder eficientemente a los desafíos que enfrentan nuestros sitios arqueológicos en un mundo cambiante y complejo.

Fuentes de información

Cauich Caamal, H. (2022). Uxmal y Ruta Puuc, sitios Patrimonio Cultural de la Humanidad (pp. 15–18). En J. Huchim Herrera (Ed.), *Retos y aprendizajes del Patrimonio Biocultural en México: XXV aniversario de la declaratoria de Uxmal, Kabah, Sayil, Xlapak y Labna como Patrimonio Cultural de la Humanidad*. Memorias. Zona Arqueológica Uxmal.

Huchim Herrera, J., y Toscano Hernández, L. (2015). Arquitectura Puuc: sistemas constructivos y restauración. En S. Huerta y P. Fuentes (Eds.), *Actas del Noveno Congreso Nacional y Primer Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción*, vol. II (pp. 831-839). Madrid: Instituto Juan de Herrera.

Huchim Herrera, J. G., y Toscano Hernández, L. (2021). El proceso de restauración en Uxmal: el caso del Palacio del Gobernador. *Gremium*, 8(15), 23–36. Recuperado de *https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=684171841004*

La fotogrametría digital en la arqueología subacuática: explorando el patrimonio sumergido de México con tecnología de vanguardia

Dr. Roberto E. Junco Sánchez

Introducción

México, cuyo territorio es uno de los más extensos y diversos de América, posee también uno de los patrimonios sumergidos más ricos y complejos del mundo. Desde contextos prehistóricos y vestigios de civilizaciones prehispánicas, hasta naufragios de la época colonial, barcos de guerra y transporte del siglo XIX. Muchas de estas evidencias se encuentran en ambientes donde la naturaleza ha permitido mantener su secreto bajo las aguas, como lagunas de altura, cenotes, ríos y arrecifes.

Estas evidencias, sin embargo, permanecen en condiciones delicadas y muchas veces desconocidas para la ciencia. Por ello, su estudio requiere de técnicas especializadas que permitan documentarlas rápidamente, sin poner en riesgo su estructura o integridad. La ciencia moderna se apoya actualmente en el uso de herramientas digitales y sistemas innovadores, siendo la fotogrametría uno de los recursos más prometedores para registrar, analizar y difundir el patrimonio sumergido.

En 2017, el equipo de la Subdirección de Arqueología Subacuática del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) integró la fotogrametría digital en sus metodologías, lo que ha tenido un impacto positivo en su aplicación para la investigación, protección y divulgación del patrimonio subacuático mexicano. En este artículo, exploraremos cómo funciona, qué ventajas ofrece y algunos ejemplos significativos de su aplicación en nuestro país.

La relevancia del patrimonio sumergido en México

El patrimonio cultural en las aguas mexicanas abarca un vasto universo de restos y sitios de gran valor histórico y cultural. La historia de México está profundamente ligada a la historia marítima: desde los barcos del siglo XVI que transportaban oro y plata desde las minas coloniales, pasando por las embarcaciones de guerra que defendieron o atacaron puertos, hasta las comunidades indígenas y coloniales que vivieron y comerciaron en las costas y ríos.

Las características del entorno acuático, incluyendo la salinidad, la acidez del agua, los sedimentos y las corrientes, influyen en la conservación de estos vestigios. La protección y un buen registro de estos restos, requiere de procedimientos específicos que involucren conocimientos arqueológicos y tecnológicos, en un esfuerzo por entender el estado actual del patrimonio subacuático y prevenir su deterioro o saqueo.

¿Qué es la fotogrametría digital en la arqueología subacuática?

La fotogrametría consiste en capturar muchas fotografías superpuestas del objeto, estructura o sitio, desde diferentes ángulos y calcular las posiciones relativas de cada imagen mediante el uso de un *software* especializado, para construir un modelo tridimensional en alta resolución. Este proceso puede realizarse en ambientes terrestres, pero en la arqueología subacuática presenta desafíos específicos asociados con la visibilidad, la turbidez del agua y las condiciones de buceo.

La clave para lograr modelos precisos radica en la planificación de las tomas, la calidad de las cámaras, la iluminación y el posprocesamiento de las imágenes. Bajo el agua se emplean cámaras digitales con luces, además de técnicas complementarias, como el uso de boya o soportes, para mantener la cámara fija y evitar que el movimiento afecte la calidad de las fotografías.

El resultado final es un modelo digital en 3D que permite analizar en detalle el estado de conservación del objeto o sitio, medir, detectar cambios en el tiempo, estudiar detalles arqueológicos y divulgarlo en plataformas digitales accesibles en cualquier parte del mundo.

¿Cómo funciona la fotogrametría en la práctica?

Para realizar un proyecto de fotogrametría subacuática, generalmente se siguen varias etapas:

1. Planificación y preparación: Se define el área o el objeto a registrar, las condiciones del ambiente, la iluminación y los recursos disponibles. Se establecen rutas de buceo y puntos de toma con suficiente solapamiento entre fotos, para garantizar el éxito del proceso.
2. Captura de imágenes: Desde diferentes ángulos y alturas, los buzos toman varias fotografías asegurándose de cubrir toda la superficie y los detalles del objeto o estructura. La calidad y cantidad de imágenes son fundamentales.
3. Procesamiento digital y generación del modelo 3D: Las imágenes se cargan en un *software* especializado en fotogrametría, como Agisoft Metashape. El programa identifica puntos en común entre las fotografías para alinearlas y crear una malla tridimensional. A partir de esto, genera un modelo digital en formatos compatibles con plataformas de visualización en línea, impresión 3D o análisis técnico. Este método permite obtener modelos en alta resolución que capturan no sólo la forma general del objeto, sino también detalles finos de la superficie, como grabados, texturas y afinaciones, fundamentales en la interpretación arqueológica. Además, el proceso puede realizarse en varias etapas, permitiendo el monitoreo del deterioro o la evaluación de acciones de conservación a lo largo del tiempo.
4. Visualización, análisis y divulgación: El modelo digital puede manipularse en entornos virtuales, lo que permite examinarlo desde diferentes ángulos y realizar mediciones precisas. También puede integrarse en plataformas web, abrirse en dispositivos de realidad virtual o imprimirse en 3D como réplicas físicas. Esto facilita la

divulgación y participación tanto del público en general, como de investigadores especializados. Uno de los grandes beneficios es que estas réplicas digitales se pueden compartir, promoviendo la protección del patrimonio en un escenario global y transparente, y ayudando a prevenir saqueos, destrucción o alteraciones durante el proceso de estudio.

Ejemplo práctico: registro de un naufragio en Baja California Sur

En 2017, nuestro equipo llevó a cabo uno de los primeros proyectos de fotogrametría en un naufragio en Baja California Sur, en colaboración con el arqueólogo japonés Kotaro Yamafune, gracias a una beca otorgada por la National Geographic Society. La embarcación, que data del siglo XIX, había sido localizada en el fondo marino y representaba un importante vestigio del patrimonio cultural subacuático, en particular por tratarse de un submarino estadounidense de la Primera Guerra Mundial hundido en 1920 en la Isla Margarita, en Baja California Sur. Yamafune tomó más de 7 mil fotografías en varias inmersiones, logrando capturar todos los ángulos del casco. El procesamiento en *software* especializado generó un modelo 3D que permitió estudiar su estado de conservación, detectar efectos de erosión, acumulación de sedimentos y daños por saqueo o vandalismo. También, facilitó la divulgación en plataformas digitales, acercando la historia del barco a turistas, investigadores y público en general, además de servir como base para futuras tareas de protección y monitoreo.

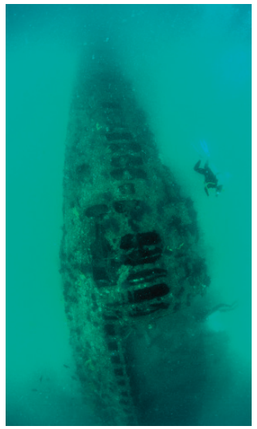




Figura 1. Vista del submarino norteamericano USS H1 Seawolf, hundido en 1920, Isla Margarita, Baja California Sur, 2018. Crédito: Subdirección de Arqueología Subacuática (SAS), Dirección de Estudios Históricos (DEH), Coordinación Nacional de Arqueología (CNA) y Kotaro Yamafune. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/altqTAJCN3w?si=wkGTzDMQSNRtaFFM&t=4350*

Figura 2. Trabajos de registro tradicional en el submarino USS H1 Seawolf, 1920, Isla Margarita, Baja California Sur, 2018. Crédito: SAS, DEH, CNA y Kotaro Yamafune. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.



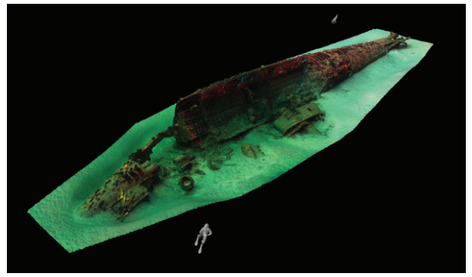


Figura 3. Vista del submarino norteamericano USS H1 Seawolf, 1920, Isla Margarita, Baja California Sur, 2018. Crédito: SAS, DEH, CNA y Kotaro Yamafune. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/altqTAJCN3w?si=9b436wvIbirMc5Qt&t=4608*
Figura 4. Fotogrametría del submarino USS H1 Seawolf, Isla Margarita, Baja California Sur, 2019. Crédito: SAS, DEH, CNA y Kotaro Yamafune. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Hacia una conservación digital y colaborativa del patrimonio sumergido

La digitalización mediante fotogrametría no sólo permite crear modelos 3D para análisis técnico inmediato, sino que también se ha convertido en una herramienta clave para fomentar una gestión colaborativa y transparente del patrimonio subacuático. La posibilidad de compartir estos modelos en plataformas abiertas, junto con su metadata y contexto arqueológico, facilita la participación de instituciones, universidades, expertos internacionales y la comunidad en general, en la protección y valoración del patrimonio sumergido mexicano.

Por ejemplo, la base de datos de modelos 3D de naufragios y sitios en México, alojada en plataformas como Sketchfab o en repositorios del INAH, permite monitorear continuamente los sitios, realizar análisis comparativos a lo largo del tiempo y difundir hallazgos sin necesidad de acceso físico, especialmente en sitios peligrosos, de difícil acceso o de alto valor patrimonial, que deben mantenerse protegidos.

También, la impresión en 3D basada en estos modelos posibilita la fabricación de réplicas físicas que pueden usarse en exposiciones, actividades educativas y programas de divulgación, democratizando el acceso a estos patrimonios. La experiencia en sitios como Baja California Sur o arrecifes del Caribe, demuestra cómo estas técnicas generan un impacto positivo en la sensibilización social y en la protección del patrimonio cultural en el mar.

Los desafíos y la visión de futuro

A pesar de sus beneficios, el uso de la fotogrametría en ambientes sumergidos enfrenta algunos desafíos técnicos, logísticos y económicos:

- Visibilidad en ambientes con turbidez y sedimentos en suspensión: La calidad de las imágenes puede verse afectada, requiriendo equipamiento especializado y condiciones ideales de buceo.
- Capacidad de procesamiento y almacenamiento: El manejo de grandes volúmenes de datos digitales demanda infraestructura tecnológica moderna, así como personal capacitado.

- Análisis avanzado: Cada vez más se hará necesario integrar inteligencia artificial para automatizar la detección y seguimiento de deterioros, saqueo o fragmentación.
- Sensibilidad ambiental: Es fundamental minimizar el impacto de las operaciones en ecosistemas frágiles y sitios en conservación activa.

Con los avances en sensores, *software* y *hardware*, estos obstáculos se están superando, y las perspectivas de crecimiento son prometedoras. La integración de la fotogrametría con otras tecnologías, como sistemas de percepción remota con drones, LiDAR en ambientes acuáticos, cámaras hiperespectrales y sensores de radiación, contribuye a ofrecer una visión más completa del patrimonio subacuático.

El futuro, de acuerdo con los avances tecnológicos, apunta hacia plataformas digitales integradas que permitan gestionar, monitorear y divulgar en tiempo real, la condición de sitios y objetos sumergidos en todo el país. Asimismo, la inteligencia artificial proporcionará análisis predictivos, alertando sobre el deterioro acelerado o el riesgo de saqueo.

El patrimonio sumergido: una herencia que debemos proteger y difundir

México, con sus vastos territorios marítimos, lagunas y ríos, posee una riqueza cultural inigualable que debemos salvaguardar sin limitar su estudio ni su divulgación. La tecnología de fotogrametría, en su fase actual, ha democratizado el acceso a estos sitios a través de plataformas digitales, los modelos en 3D pueden ser estudiados por especialistas y disfrutados por cualquier ciudadano, fomentando una mirada inclusiva y educativa que impulse el respeto y la protección del patrimonio sumergido.

Este avance también contribuye a atender una de las mayores amenazas: el saqueo y el vandalismo, causantes en muchos casos de destrucción o robo de objetos y restos valiosos. La documentación digital pública y transparente actúa como un mecanismo de control que ayuda a detectar y prevenir acciones ilícitas.

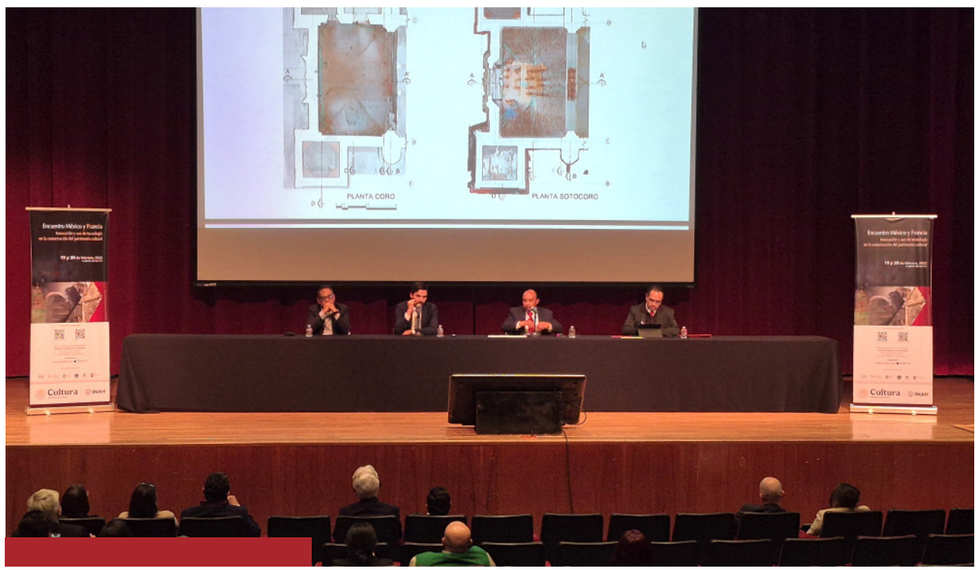
Por otro lado, la conservación digital ofrece un registro exhaustivo para las futuras generaciones y permite la reconstrucción en caso de siniestros naturales o humanos. Esto representa no sólo un avance técnico, sino también un compromiso ético y cultural ineludible.

Conclusión

La incorporación de la fotogrametría digital en la arqueología subacuática ha revolucionado la forma de documentar, analizar, conservar y divulgar el patrimonio sumergido en México. Desde expediciones en naufragios históricos hasta el registro de esculturas y construcciones en ambientes sumamente complejos, estas tecnologías nos ofrecen un mapa tridimensional, preciso y accesible, que preserva la historia en un formato digital, útil tanto para expertos como para la comunidad en general.

El compromiso futuro requiere inversión en capacitación, infraestructura tecnológica y cooperación internacional, para impulsar estos avances en todo el país y en América Latina. La visión integrada de conservación digital potenciará la protección del patrimonio sumergido, además de fomentar su valoración y divulgación en beneficio de toda la sociedad.

Mesa 4
Resiliencia y seguridad estructural del patrimonio cultural







Moderador: **Dr. Moisés Juárez Camarena**
Coordinador del Comité Técnico de Seguridad Estructural del Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM)

Secretario: **Dr. Norberto Domínguez Ramírez**
Comités de Resiliencia de la Infraestructura y de Seguridad Estructural del CICM

Para mayor detalle escanea el código QR y podrás ver la transmisión completa de esta sección del Encuentro México y Francia

Crédito: EE-Laura Nayeli Guerrero Barajas.
Esta página
Excepto retratos oficiales de ponentes.





Evaluación del comportamiento mecánico de bóvedas de la Catedral de Notre Dame de París
Dr. Thomas Parent (Participación virtual)
Profesor adscrito al Laboratorio I2M del Instituto de Mecánica e Ingeniería perteneciente a la Universidad de Burdeos



Métodos innovadores en ingeniería estructural para la preservación del patrimonio
Dr. Charles Shahrokh Ghavamian
Director General de Sixense Necs



Análisis estructural a partir de nubes de puntos
Mtro. en Arq. Fabián Bernal Orozco Barrera
Profesor de Estructuras en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)



Estrategia integral de análisis estructural para la conservación del patrimonio histórico
Dr. Fernando Peña Mondragón
Investigador y Coordinador de Ingeniería Estructural del Instituto de Ingeniería de la UNAM

Nota: Imágenes con enlace Web fueron transmitidas por INAH TV durante el evento realizado en el Auditorio Jaime Torres Bodet (Museo Nacional de Antropología).

Crédito: EE-Laura Nayeli Guerrero Barajas.
Esta página
Excepto retratos oficiales de ponentes.

Resiliencia y seguridad estructural del patrimonio cultural

Con identidades culturales muy propias y características, México y Francia son poseedores de un amplio patrimonio arquitectónico que es parte del legado cultural y artístico de ambos pueblos, y por ello deben preservarse para beneficio de la humanidad. En este contexto, la resiliencia y la seguridad estructural del patrimonio cultural se vuelven instrumentos fundamentales para asegurar la preservación de monumentos y edificaciones históricas frente a riesgos por desastres y fenómenos naturales, el paso del tiempo y la intervención humana, entendiendo por resiliencia la capacidad propia de las estructuras a restablecer sus condiciones ordinarias de funcionamiento. Luego de haber sido sometidos a acciones extraordinarias fortuitas (un huracán, un sismo, una explosión), se vuelve de la mayor importancia aprovechar y fortalecer dicha capacidad para salvaguardarlas. Por otra parte, la seguridad estructural se refiere a mantener en las edificaciones un nivel aceptable de integridad y estabilidad que garantice su uso en cualquier escenario (incluyendo el cotidiano); para ello, se requieren metodologías matemáticas que en su conjunto se conoce como análisis estructural.

El análisis estructural desempeña un papel clave en este proceso, ya que permite evaluar matemáticamente la estabilidad de las construcciones históricas, identificando debilidades y posibles amenazas a su integridad. El análisis estructural ha evolucionado desde la época de Leonardo da Vinci (quien creó el término "fractura"), hasta los potentes recursos informáticos con los que cuentan los ingenieros en la actualidad, como el modelado computacional y el análisis matricial con los que se puede simular el comportamiento original de los materiales, la respuesta de los componentes estructurales y su interacción en un sistema estructural, de tal modo que es posible detectar problemas o potenciales puntos de falla en la estructura, y proponer soluciones adecuadas para reforzarla sin comprometer su valor histórico. Este enfoque integral no sólo mejora la seguridad de los bienes culturales, también aumenta su resiliencia, asegurando su capacidad de adaptación y recuperación ante eventos adversos. De esta manera, el análisis estructural contribuye a un enfoque sostenible de conservación, garantizando la protección del patrimonio cultural para las generaciones futuras.

En las mesas anteriores se mencionaron varios conceptos sobre peligro, riesgo, vulnerabilidad y resiliencia. Por tanto, el propósito de las ponencias de esta mesa es mostrar

la forma en cómo se están utilizando las nuevas tecnologías para evaluar y determinar el estado de la resiliencia y el grado de seguridad estructural que guarda el patrimonio cultural, especialmente mediante la aplicación de técnicas y tecnologías novedosas de medición y de análisis de modelado computacional aplicando métodos numéricos, como el Método de Elementos Finitos (MEF) y las técnicas avanzadas de no linealidad material y estructural.

Moderador: **Dr. Moisés Juárez Camarena**
Secretario: **Dr. Norberto Domínguez Ramírez**

Evaluación del comportamiento mecánico de bóvedas de la Catedral de Notre Dame de París

Dr. Thomas Parent (Participación virtual)

Este trabajo de investigación se refiere a la evaluación del comportamiento mecánico de las bóvedas de la Catedral de Notre Dame de París. Lo presento en nombre del grupo de trabajo de estructura, con el cual trabajamos la evaluación del comportamiento mecánico de la catedral.

El trabajo se situó en un contexto particular. Después del incendio de la catedral se puso en marcha una obra científica para su rescate, auspiciada por el Centro Nacional de la Investigación Científica (CNRS) y el Ministerio de Cultura. Yo trabajé con el grupo estructura y llevamos a cabo dos acciones en paralelo sobre los aspectos relativos al cálculo de la estructura en piedra de los monumentos, como especialista que soy en el cálculo de la estructura y en albañilería.

Asimismo, establecimos una asociación de investigación y desarrollo entre el grupo de trabajo de la Catedral de Notre Dame de París y la Universidad de Burdeos, con el objetivo de ayudar a los arquitectos y la dirección de obra, acompañarlos en la evaluación del comportamiento posterior al incendio de las bóvedas de la catedral, y también llevamos a cabo un proyecto de investigación junto con la Agencia Nacional de Investigación (ANR), todo lo cual nos permitió desarrollar métodos de cálculo innovadores para la evaluación estructural posterior a un siniestro, de los monumentos históricos.

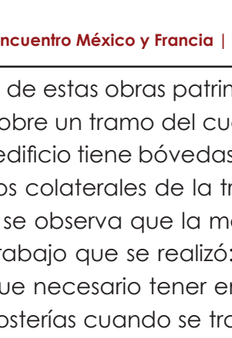
En este contexto, sabemos que hay un gran número de edificios antiguos en mampostería en todo el mundo abiertos al público y, por lo tanto, con requisitos reglamentarios y normas de seguridad específicas. Por ser edificios con gran valor patrimonial, cuando existe una duda estructural, contrario a lo que pasaría con construcciones más contemporáneas, se descarta la idea de la demolición porque lo que se busca es su preservación, restauración y, en última instancia, su reconstrucción.

En el caso de la catedral, se trata de un material compuesto y, por tanto, complejo para estudiar, ya que es anisotrópico, heterogéneo, admite un comportamiento no lineal y disimétrico, por lo que su comportamiento mecánico resulta bastante complejo de determinar por estas propiedades, y porque está limitado en términos de ensayos destructivos al tratarse de estructuras patrimoniales.

Lo anterior nos llevó a una compleja geometría 3D, a la que se sumó el caso de las bóvedas góticas, como las de Notre Dame, que tienen doble curvatura. Además, por ser edificios antiguos cuentan con un historial de carga difícil de identificar, al igual que sus conexiones. Con toda esta complejidad, la cuestión era cómo evaluar la estabilidad

mecánica de estas obras patrimoniales. Como grupo de estructura, en Notre Dame trabajamos sobre un tramo del cuerpo de la catedral evaluando su comportamiento. Esta parte del edificio tiene bóvedas sexpartitas, los arcos abriéndose que vuelven a empujar al vacío, los colaterales de la tribuna. Aquí se ve una imagen de la bóveda sexpartita, en donde se observa que la mampostería es bastante compleja, y su doble curvatura. Ése es el trabajo que se realizó: modelar el comportamiento mecánico de estos arcos. Para ello fue necesario tener en cuenta algo importante: la fisuración que aparece en las mamposterías cuando se trata de someter cargas a la estructura; y aunque la fisura no sea perjudicial para el equilibrio de la estructura, es necesario tenerla en cuenta para considerar bien la redistribución de las tensiones asociadas a dicha fisuración.

Éste es un ejemplo de cálculo de un arbotante o medio arco obtenido mediante el Método de Elementos Discretos (MED) y se observa que, efectivamente, en algunos lugares hay una apertura de grietas; por tanto, al realizarse la redistribución de las tensiones y los modelos, se debe tener en cuenta este tipo de fenómeno. En nuestros cálculos, utilizamos diferentes tipos de modelos, diferentes tipos de estrategias, como la llamada estrategia a bloque que consiste en considerar la albañilería como un conjunto de bloques distintos, pero conectados por leyes de contacto, así que tuvimos también diferentes leyes de contacto. De lo contrario, se habrían obtenido modelizaciones continuas que considerarían la mampostería como un material homogeneizado, es decir, como un único material en el que se van a encontrar las propiedades tanto de los bloques como de las juntas de mortero.



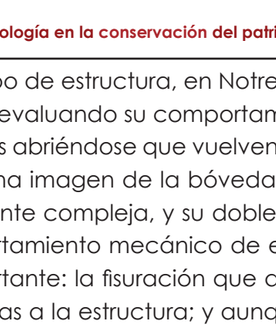


Figura 1. Fotografía del interior de la Catedral de Notre Dame.
Figura 2. Dibujo de Notre Dame por Eugène Viollet-le-Duc.

En nuestro grupo de trabajo tenemos tres métodos de cálculo distintos que funcionaron en paralelo: un método bloque a bloque elemento, desarrollado por el Laboratorio LMGC de Montpellier; un método bloque a bloque elementos finitos, desarrollado por el Laboratorio GSA; y un método continuo, desarrollado por el Laboratorio LMDC. Todos, laboratorios franceses de investigación que trabajaron para el grupo estructural en la evaluación estructural de la Catedral de Notre Dame. Se hicieron comparaciones sobre la eficiencia de estos diferentes tipos de modelos de cálculo, y no hay uno que sea mejor, porque todos son capaces de reanudar la redistribución de las tensiones y grietas en mampostería.

En las hipótesis de cálculo, para hacer un cálculo mecánico también es necesario conocer las propiedades mecánicas de las piedras en su lugar, y para ello se realizó la medición de la velocidad del sonido, en particular en la travesía del corazón y en un gran conjunto de puntos sobre la obra. Estas medidas nos permitieron, a través de correlaciones y de remontarse a la evaluación de un módulo de elasticidad de una resistencia de compresión de las piedras calcáreas, alimentar los modelos de cálculo. Hay ciertos parámetros de los materiales que no pudimos estimar con estas herramientas de velocidad del sonido y también hicimos pruebas en laboratorio.

Aquí se ve un ensayo de tracción para caracterizar el desempeño en tracción de la interfaz entre la piedra y el mortero, lugar donde también se hicieron ensayos a escala del muro para conocer el comportamiento homogeneizado de las mamposterías. Para elaborar nuestras hipótesis de cálculo se necesitaban las geometrías, por lo cual nos basamos en el trabajo realizado por la oficina de Estudios Stoneau y en el *story map*, o mapas digitales, en el que trabaja Livio de Luca, presentado antes.

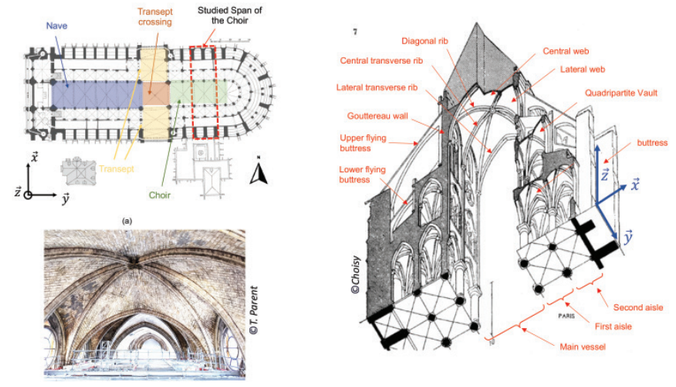


Figura 3. Diagramas del interior de la Catedral de Notre Dame. Crédito: Imagen por el autor. Dibujo por Choisy.

Hay dos tipos de geometría basada en nubes de puntos. Está la geometría de bloque a bloque para mostrar los modelos de bloque a bloque donde se observa la estereotomía de los bloques; la otra es la geometría continua, donde sólo se tiene la malla y no se distinguen los bloques. Ésta es la geometría que se utiliza para los modelos continuos. Así es como se ve la geometría que usamos para estudiar la Catedral de Notre Dame de París, en rojo tenemos las bóvedas sexpartitas con dobles curvaturas y en verde los apoyos. Cabe señalar que no modelamos toda la catedral, nos detuvimos por debajo de las paredes gotelé, porque se debía trabajar rápido en los tiempos de cálculo.

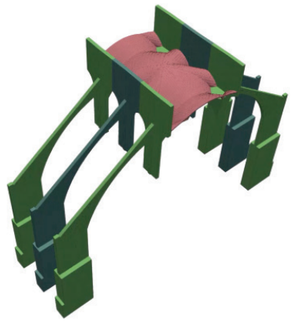


Figura 4. Diagramas para la Catedral de Notre Dame.

El principio de la evaluación estructural fue el siguiente. Se analizó el tramo dividiéndolo en dos subestructuras: la subestructura azul, correspondiente a las bóvedas; y la subestructura verde, en la que los arcos ejercen un empuje hacia el exterior siendo, en realidad, los arbotantes y la culata las estructuras que permiten reanudar los empujes horizontales. Para realizar el trabajo, cortamos estas dos subestructuras y las estudiamos de manera independientemente con el objetivo de describir sus leyes de comportamiento, las cuales se ubican en las curvas que representan la fuerza horizontal impuesta en función del desplazamiento estructural. Y el punto de intersección de estas dos leyes de comportamiento nos dio, en cierto modo, el punto de equilibrio entre ambas subestructuras, de vital importancia para evaluar la estabilidad de los arcos.

Ahora presentaré los diferentes tipos de cálculo que realizamos durante nuestros estudios sobre la Catedral de Notre Dame de París. El primero se refiere al estudio del arbotante con el hundido. Aquí tienen una carrera que muestra la evolución de la fuerza, en función del desplazamiento impuesto en la cabeza del medio arco. Observen que en la parte de la izquierda, trato de empujar el arco hacia ese lado, es decir hacia el exterior de la nave central; ante esta acción, se puede ver que el arco abovedado se comprime y hay una ruptura por flexión de la culata, con una fisura que se observa aquí. Esta ruptura es para fuerzas bastante altas, del orden de 250 kilonewtons (kN), sabiendo que el equilibrio se ubica con más certeza a 75 kN en empuje pasivo.

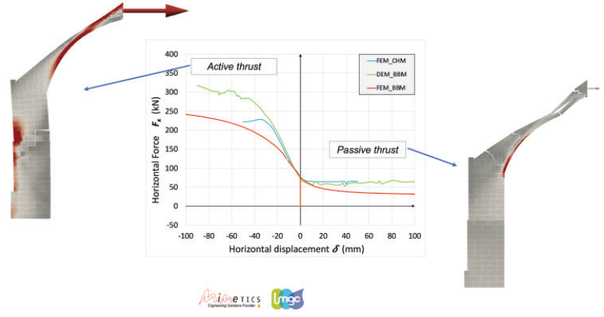


Figura 5. Diagramas para la Catedral de Notre Dame.

En el otro lado, cuando tiro sobre el arbotante ocurre algo completamente diferente: uno la cuerda que no trabaja demasiado, y allí el medio arco que se va a venir, se agrietará en tres rótulas para convertirse en isostático; por lo tanto, tenemos una especie de empuje asintótico bastante bajo y que se mantiene constante.

Éstos son los resultados de los diferentes modelos de cálculo, los cuales mostraron que son concordantes y dieron los mismos perfiles de fisuración, lo que nos dio confianza en los resultados obtenidos.

Ahora presentaré la evaluación. Ya expuse el cálculo mecánico, lo que veremos ahora es la evaluación del comportamiento de las bóvedas ante el fuego y el cálculo de la estructura frente a la temperatura alcanzada. Luego del siniestro encontramos bóvedas derrumbadas y la caída de la flecha durante el incendio, lo cual está relacionado y volveré a hablar de ello.

Con la tecnología de nubes de puntos aplicada antes y después del incendio, se encontraron desplazamientos verticales en la estructura, como lo muestra un mapa realizado por el Estudio Bestrema, que muestra en azul los desplazamientos positivos hacia arriba y en rojo los negativos hacia abajo. Estos datos nos permitieron validar nuestros modelos de cálculo. También se observó que a causa del incendio se generaron fisuras en los cimientos de la bóveda, y que el aumento de la temperatura impactó las altas mamposterías de la catedral, lo cual se puede observar en las piedras porque, como sabemos, cuando calentamos una piedra se daña y cambia de color.

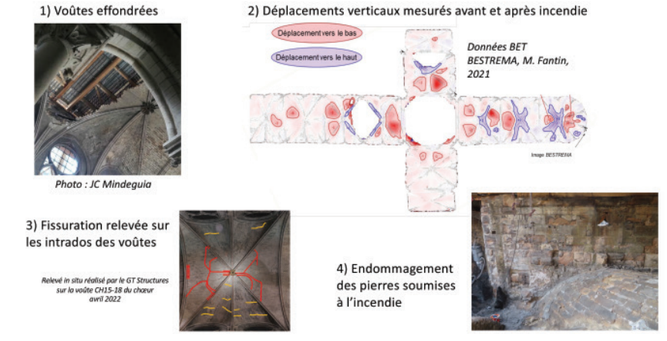


Figura 6. Diagramas para la Catedral de Notre Dame.

Para tener en cuenta esta carga térmica fue necesario evaluar el nivel de temperatura alcanzado, por esta razón se llevó a cabo una operación de extracción de núcleos, o extracción de testigos, sobre las bóvedas del corazón de la Catedral de Notre Dame de París, en los que se observó un cambio de color. Aquí está el lado expuesto al fuego y a la derecha el lado no expuesto al fuego, donde se ve bien que hay un cambio de color. Después, lo importante fue relacionar este cambio de color con el nivel de temperatura alcanzado. Se tomaron materiales equivalentes que se calentaron en un horno y se analizaron los niveles de color resultantes a diferentes temperaturas. Mediante el análisis colorimétrico, pudimos obtener una especie de referencial que permite saber a qué temperatura se alcanza x nivel de luminosidad relativa, con lo cual logramos tener

información sobre el nivel de temperatura de los núcleos en la profundidad del arco. Gracias a esto se obtuvieron los perfiles de temperatura estimada, esto es que las piedras alcanzaron entre 350 y 550 o incluso 600 grados en el nivel máximo, según los testigos extraídos de las bóvedas.

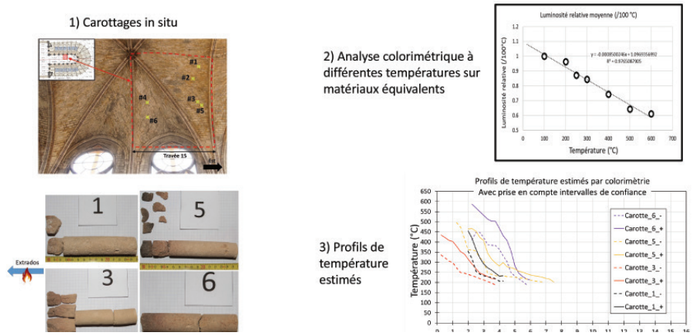


Figura 7. Diagramas para la Catedral de Notre Dame.

Lo anterior, nos permitió definir escenarios de carga realistas para el cálculo térmico. Después se modeló el arco y luego se aplicó esta carga térmica en los núcleos extraídos del arco. Éste es un resultado del cálculo realizado por el LMDC de Toulouse donde, por lo que se ve aquí, es la simulación del incendio tomando en cuenta las dilataciones térmicas del fuego. Lo que se constata es que durante el incendio se generó un empuje bastante fuerte.

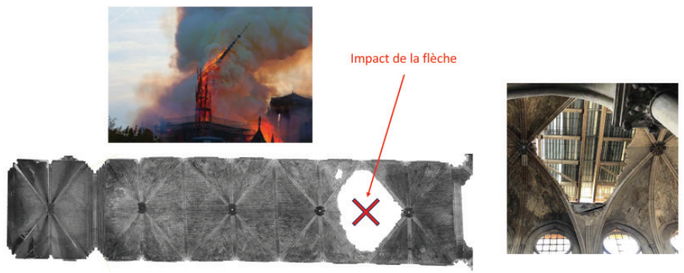


Figura 8. Diagramas para la Catedral de Notre Dame.

Luego tenemos el enfriamiento, donde observamos los movimientos que se produjeron, notándose una forma de X con desplazamientos hacia arriba al final del incendio, los cuales también se encontraron en el nivel de la correlación en el estudio de nubes de puntos. Esto validó los modelos y nos permitió estimar una capacidad residual de resistencia de las bóvedas.

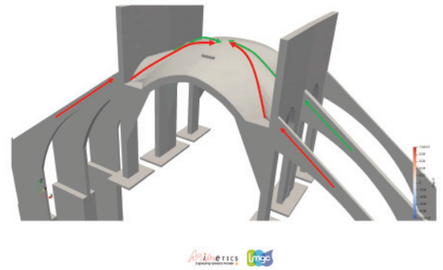


Figura 9. Diagramas para la Catedral de Notre Dame.

Un punto interesante que se encontró fue que cuando el fuego se declaró, ya había dilatado los materiales generando empujes importantes en el nivel de los arcos que los unían. En tiempos normales el arbotante soportaba 7.5 toneladas, pero durante el incendio duplicó su recuperación, es decir 15 toneladas, lo cual estaba relacionado exactamente con el aumento de la dilatación de las bóvedas.

Otro cálculo que realizamos fue sobre el comportamiento de los conjuntos de contrapuntas de la nave durante la caída de la flecha, de 96 metros de altura, también conocida como la aguja, diseñada por Eugène Viollet-le-Duc en el siglo XIX. Durante el incendio la flecha cayó sobre las bóvedas de la nave, causándoles un agujero gigante. El impacto ocurrió entre dos llaves sexpartitas de las bóvedas de la catedral. La caída se simuló con el Método de Elementos Discretos, cuyos cálculos estuvieron a cargo del Laboratorio LMDC y la *start up* Mimética. La simulación indica que la flecha impactó esta zona, ocasionando un colapso de la parte central; sin embargo, lo que vemos al final del cálculo es que aún había un equilibrio desde el conjunto del arbotante de la bóveda, lo cual está relacionado con el hecho de que los esfuerzos de los arcos arbotantes se reanudan por las paredes diagonales de la cúpula, lográndose un equilibrio.

Una pregunta que queda en el aire es: ¿qué habría pasado si la flecha hubiera caído unos metros al lado, en un lugar clave? Éste es el resultado de la simulación para responder a esa interrogante. El impactador (la flecha) que antes estaba aquí, ahora va a estar en el nivel de la piedra angular, por tanto el conjunto de la bóveda se habría derrumbado. Lo anterior, porque al registrarse una mayor carga, el equilibrio de los arcos abovedados ya no se puede mantener, se dificulta, generándose una posterior ruptura de los mismos, debido al empuje activo del arbotante, empuje que la bóveda ya no puede contrarrestar ocasionándose el colapso total de la catedral.

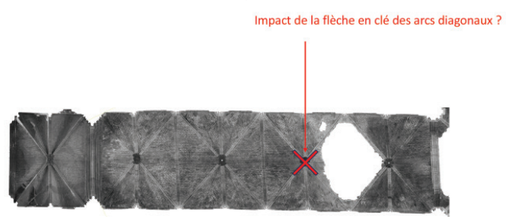


Figura 10. Diagramas para la Catedral de Notre Dame.

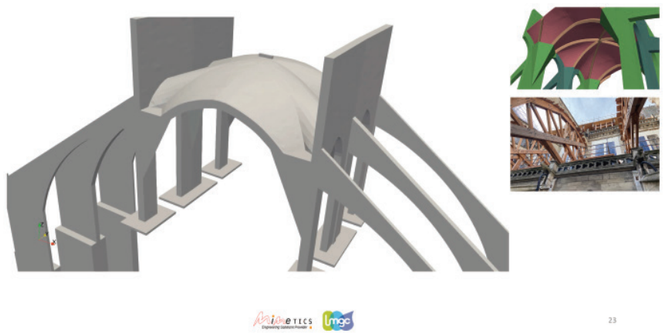


Figura11. Diagramas para la Catedral de Notre Dame.

Conclusiones

En resumen, presentamos diferentes tipos de cálculo que se pueden llevar a cabo. Lo interesante es que fue una investigación interdisciplinaria y con múltiples participantes, como fue la asociación I + D y el Proyecto ANR Demefi.

También se expuso la implementación de una metodología de diagnóstico multidisciplinaria, que va desde ensayos no destructivos *in situ* a la aplicación de modelos geométricos, así como de modelos numéricos.

De igual forma, se mostró cómo en nuestro grupo de trabajo utilizamos varios tipos de modelos, como una forma interesante de complementariedad para validar nuestros cálculos.

Además de la importancia de evaluar el comportamiento mecánico de las bóvedas de la catedral y ayudar a los arquitectos a medir su estabilidad.

Para terminar, es importante señalar la complementariedad de los métodos, porque cada uno es diferente pero complementario, lo que permitió afinar el diagnóstico. De ahí la importancia de cruzar los procedimientos para dar veracidad y confiabilidad al diagnóstico.

*Fotografías/*slides*/gráficas tomadas de presentación compartida para el Encuentro por parte de Thomas Parent.

Métodos innovadores en ingeniería estructural para la preservación del patrimonio

Dr. Charles Shahrokh Ghavamian

Una gran parte de mi actividad en el despacho de ingeniería gira en torno a la industria nuclear y sin embargo, cuando me tomé el tiempo para reflexionar sobre el pasado y la evolución que se ha tenido durante los últimos 25 años, me encontré con un mensaje que vale la pena compartir con ustedes, con el deseo de que esta historia resuene de forma particular en el contexto de la preservación del patrimonio y en la contribución que los métodos matemáticos avanzados han tenido en su estudio.

Trazando un panorama general de cómo han evolucionado los enfoques de los estudios de ingeniería, evidentemente todo comienza con el empleo de fórmulas matemáticas sencillas con las cuales se podía responder a preguntas relativamente simples, mientras que para problemas más complejos –tomando las precauciones debidas–, podían proponerse soluciones ingenieriles aceptables, lo que permitió realizar obras y monumentos extraordinarias, algunos de los cuales han trascendido en la historia.

Con el tiempo todo fue evolucionando, las necesidades, las aplicaciones, hasta llegar a cosas más simples, más operativas. No obstante, el contexto económico global requirió que estos conocimientos se difundieran lo más ampliamente posible a través de la formación educativa de ingenieros, basada en tablas y calculadoras. No fue hasta los años setenta y ochenta del siglo XX cuando llegaron las primeras computadoras con precios abordables que permitieron refinar metodologías –que yo llamo en mi presentación "tradicionales"– para las cuales se adoptan simplificaciones que esquematizan el funcionamiento de edificaciones y de estructuras en donde se asume que los materiales tienen un comportamiento elástico lineal y por lo tanto, se limita el uso de todas las capacidades estructurales, con el fin de evitar cualquier modo de falla o de inestabilidad, o bien daños locales no deseados.

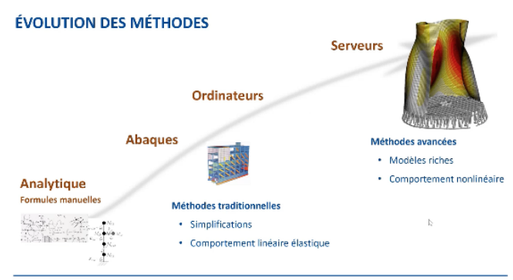


Figura 1. Evolución de los métodos.

Posteriormente llegaron los métodos avanzados de análisis y simulación numérica que desde hace algunos años se utilizan cada vez más entre la comunidad ingenieril, gracias a los avances algorítmicos y tecnológicos, al desarrollo acelerado de computadoras y servidores, a la reducción del precio de los cálculos estructurales, y particularmente, a la formación educativa y al fortalecimiento de las competencias de los ingenieros.

Es importante mencionar que todo lo expuesto previamente está relacionado con los acontecimientos mundiales y las necesidades que se han derivado de éstos: he trazado un panorama que comienza con el trágico evento del 11 de septiembre de 2001 en la primera década del siglo XXI y continúa hasta nuestros días cuando las mayores preocupaciones son de orden energético y ecológico, pasando por otros eventos desastrosos como son sismos, inundaciones o incendios que han provocado derrumbes y colapsos de diversas edificaciones. Paralelamente surgen los Eurocódigos, las normas de construcción aplicables en Europa, de los cuales resalta el Eurocódigo 8 establecido para sismos, que será el foco principal de mi presentación. Otro evento mayor fue el accidente de Fukushima en Japón, seguido de las necesidades del mercado respecto de la industria aeroespacial y la economía de guerra a través de los conflictos.



Figura 2. Historia de acontecimientos mundiales y normas.

Mi presentación se enfoca particularmente en los Eurocódigos, una norma moderna que abre la puerta a muchas aplicaciones y a la posibilidad de ir más lejos en la integración de diversos fenómenos físicos con mejores aproximaciones que permiten simular de mejor manera los materiales: precisamente los Eurocódigos permiten el uso de métodos no lineales y otros métodos sofisticados, que son el corazón de mi presentación.

Para ello, se tomará de marco de referencia tanto al Eurocódigo 8 como al accidente nuclear de Fukushima ocurrido el 11 de marzo de 2011, el cual fue un acontecimiento histórico cuyas consecuencias en todo el mundo obligaron a reexaminar la capacidad de las estructuras para resistir eventos imprevistos.

Si comparamos los métodos tradicionales con los métodos avanzados, debo compartir con ustedes algunos conceptos clave: los métodos tradicionales se sitúan en lo que ven a la izquierda, como lo he mostrado al principio, fórmulas simplificadas en donde el comportamiento del material se limita a su campo elástico. Al contrario de esto, los métodos avanzados permiten ir mucho más lejos, a aprovechar los recursos reservados, a desarrollar los procesos según diferentes enfoques; por ejemplo, puede usarse el método "pushover" o uno más refinado como es el método transitorio no lineal, ambos entre los

métodos más avanzados que existen actualmente, tanto en el mundo de la investigación como en el mundo de los despachos de ingeniería y en donde ambos métodos son utilizados ampliamente.

Mediante este ejemplo les muestro el caso de un edificio que se encuentra cerca de Grenoble en Francia. Lo que vemos aquí es un reactor, en el Instituto Laue-Langevin: luego del terremoto de Fukushima, el reactor tenía que demostrar su capacidad para resistir mayores niveles de sismicidad, sobre todo porque se trata de una instalación nuclear situada cerca de una ciudad y, por tanto, las exigencias de seguridad son elevadas. Cuando se produjo el terremoto de Fukushima, los operadores del reactor estaban preocupados por saber cuál sería su futuro, sabiendo que las autoridades de seguridad les pedirían que demostraran su eficiencia durante la ocurrencia de terremotos de mayor magnitud. En esta gráfica les muestro el comportamiento de esta instalación para niveles de terremoto cada vez más altos: éstos son los movimientos del edificio en vertical y en horizontal, en términos de desplazamientos relativos. Esta gráfica muestra que una estructura diseñada para soportar 100 por ciento de un nivel de sismo de la época de su construcción, a través de métodos avanzados puede revisarse su comportamiento ante niveles más elevados de sismos y se puede constatar a través de estas figuras, que aparecen microfisuras y daños locales que no son graves ni ponen en peligro la seguridad de la instalación. Estos gráficos muestran que somos capaces de ir 50 por ciento, e incluso 100 por ciento más allá del nivel inicial de diseño y demostrar que la estructura puede seguir cumpliendo su función con seguridad.

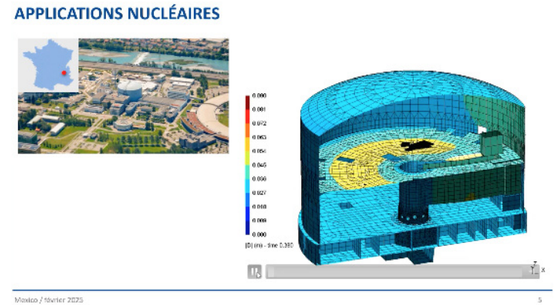


Figura 3. Aplicaciones nucleares.

Esta demostración permitió convencer a otros actores de la industria y utilizar este método en varios lugares en el ámbito nuclear y resolver muchos problemas inminentes, porque el accidente de Fukushima, el "terremoto" que generó en la industria, pudo causar trabajos colosales para reforzar estas instalaciones o peor aún en algunos casos, condenarlas a su clausura. Es un ejemplo donde puede apreciarse que los métodos avanzados permitieron resolver un problema, un verdadero desafío en un sector industrial. En lo que a nosotros corresponde respecto a nuestro coloquio, he visto que poco a poco el dominio de estos métodos ha permitido que el acceso a ellos sea más fácil, con condiciones económicas mejor adaptadas, para aplicarlos en campos distintos al de la energía nuclear. Aquí les muestro el ejemplo del edificio de la prefectura, que es

un edificio relativamente imponente en el paisaje. Es un edificio que debe permanecer de pie por razones de seguridad, la seguridad de la región en caso de un siniestro o de un accidente. De igual forma, la utilización de estos métodos avanzados ha permitido demostrar que el costo de las obras de edificación sísmica puede reducirse hasta en un 90 por ciento gracias a tales métodos avanzados.

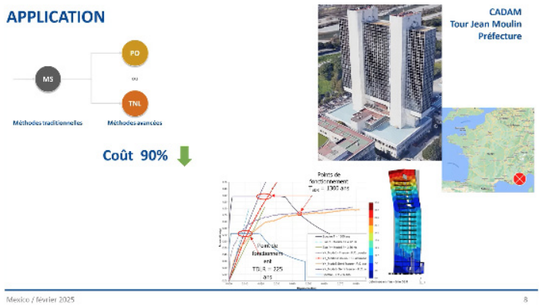


Figura 4. Aplicación en el edificio de Prefectura.

Veamos ahora los mismos métodos aplicados a obras mucho más antiguas, como en el caso de un establecimiento termal (Eaux-bonnes). Se trata de una infraestructura con bloques de albañilería, sujeta a una transformación para hacerla más adecuada en relación con el uso actual y darle una nueva vida económica. La utilización de estos métodos permite eliminar deficiencias y dificultades que no pueden justificarse con los métodos tradicionales.

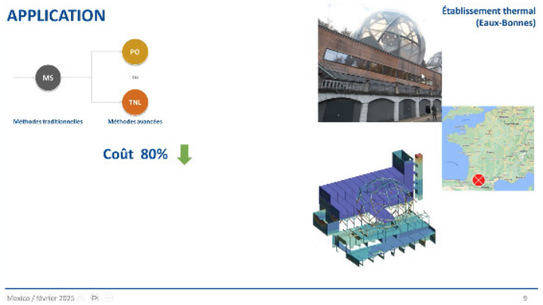


Figura 5. Aplicación en establecimiento termal.

Se pueden aplicar estos métodos en casos todavía más recientes, como puede ser el de un hotel, por ejemplo. En este caso, el hotel no puede ser reemplazado por varias razones arquitectónicas o históricas. Sabiendo que el propietario desea ampliar el establecimiento añadiendo algunos pisos, la posibilidad de emplear métodos avanzados permite hacer el proyecto económicamente viable con una reducción significativa de los trabajos de reacondicionamiento. Otro ejemplo es el Gran Palacio en Antibes, El Provenzal, Francia, que ha sido restaurado. La simulación avanzada permite redistribuir los esfuerzos mecánicos, movilizar las capacidades de las estructuras de los diferentes blo-

ques de construcción y llegar a una solución interesante. Con este método se identifican los elementos más débiles para los cuales es indispensable el reforzamiento, y separarlos de aquellos otros cuyas capacidades resultan suficientes en relación con la demanda que tendrán.

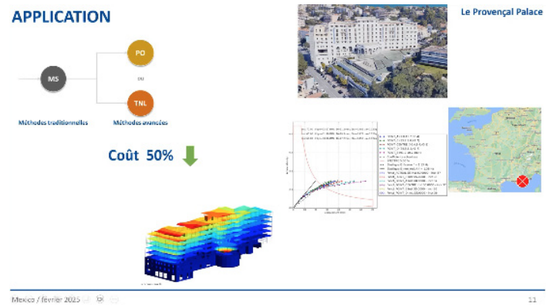


Figura 6. Aplicación en establecimiento termal en el Gran Palacio en Antibes, El Provenzal.

El mismo intento se ha aplicado en el Palacio del Festival de Cannes, con estudios sobre el conjunto de los bloques. Es una estructura bastante interesante, ya que cada uno de estos bloques tiene un comportamiento sísmico muy diferente.

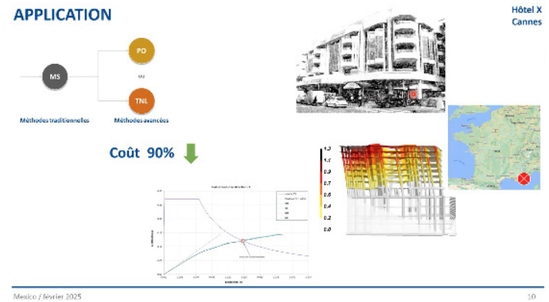


Figura 7. Aplicación en el Palacio del Festival de Cannes.

En el caso de Mucem, que es una obra cultural que se encuentra en Marsella, fue al momento de su concepción cuando los métodos avanzados permitieron llegar a una solución muy interesante, y reducir el coste del 5 por ciento sobre la parte principal.

El último ejemplo que les presento es la aplicación de los mismos métodos en El Caribe, para los estudios de una iglesia que sufrió daños muy importantes durante un terremoto. Antes de concluir, les comparto esta gráfica para mostrarles que en métodos de análisis existe un gran número, los más avanzados son análisis temporales no lineales (algunos mal traducidos como “análisis tiempo-historia”) y “pushover”, y cuando se aplican correctamente en situaciones que se prestan para implementarlos, se observa una evolución/disminución del costo de reforzamiento y un mejoramiento de la salvaguarda del patrimonio que hace su uso muy interesante.

En el caso de edificios nuevos, durante el diseño, los métodos avanzados permiten llegar a estructuras que son más simples, más fáciles de construir, reducir las cantidades, utilizar los materiales más convenientes en los lugares adecuados y sobre todo, llegar a una estructura cuyo desempeño es homogéneo.

En el caso de los edificios existentes, estos métodos avanzados permiten prolongar la vida útil de las obras en condiciones económicamente ventajosas y dar lugar a estructuras más seguras.

Aquí quisiera compartir con ustedes algunas buenas prácticas:

- Inevitablemente, los métodos innovadores vienen con trampas y complejidades, por lo que es importante tener algunos reflejos, como analizar y criticar los datos de entrada y los requisitos asociados;
- Elegir los métodos correctos, el sentido común nos permite abordar un problema de manera gradual, primero con los métodos habituales y simples, y luego aumentar la complejidad cuando esté justificado;
- Confiar en el sentido común del ingeniero el cual es un ingrediente indispensable, porque uno puede cometer rápidamente errores y hay que saber detenerse cuando no hay nada más que hacer, o seguir enriqueciendo los modelos e ir hacia la sofisticación cuando se trata de eso.

Para concluir, quiero decir que el medio del análisis y diseño de estructuras en ingeniería civil nunca ha estado muy orientado hacia la innovación, es relativamente tranquilo y estable, por no decir anticuado; y sin embargo, se observa que motivado por las necesidades se ha podido encontrar salidas y recursos derivados de la investigación y el desarrollo, poniendo en marcha soluciones que permiten levantar construcciones más seguras.

Las necesidades son también de orden ecológico, reciclar lo menos posible consiste en no construir si se pueden salvar edificios existentes: ésta es la mejor solución para reducir la huella ecológica.

Por supuesto, la complejidad de los métodos avanzados va de la mano con la formación adecuada de ingenieros para especializarse en habilidades específicas y, por supuesto, la experiencia. La última palabra es una inversión que sea rentable. Espero que los ejemplos que he compartido con ustedes lo demuestren.

Gracias por su atención y espero que a pesar del formato a distancia y grabado de mi presentación, haya podido transmitir el mensaje que deseaba compartir con ustedes.

*Fotografías/*slides*/gráficas tomadas de presentación compartida para el Encuentro por parte de Charles Shahrokh Ghavamian.

Análisis estructural a partir de nubes de puntos

Mtro. en Arq. Fabián Bernal Orozco Barrera

Primero que nada, gracias por la invitación. Para comenzar quiero hablar del título de la presentación. Es evidente que sólo a partir de una nube de puntos no se puede realizar un análisis estructural. Hay ciertos principios, de los cuales algunos ponentes ya han hablado, y quiero repasar algunos rápidamente.

Fundamentos del análisis estructural en mampostería

La mampostería es un material unilateral, es decir que solamente resiste compresiones, la resistencia de tracción es nula; es decir que es exactamente lo opuesto a un cable que resiste tracción y no compresión. Entonces, a partir de ese principio podemos entender cómo funciona una estructura de mampostería. El primero que lo menciona y lo deja escrito es Robert Hooke en 1676, quien describe: "Del mismo modo que cuelga el hilo flexible, así, pero invertido, se sostendrá el arco rígido". Aun con ese principio tan sencillo, tan fundamental, a veces se pierde la idea de cómo se sostiene una estructura de mampostería.

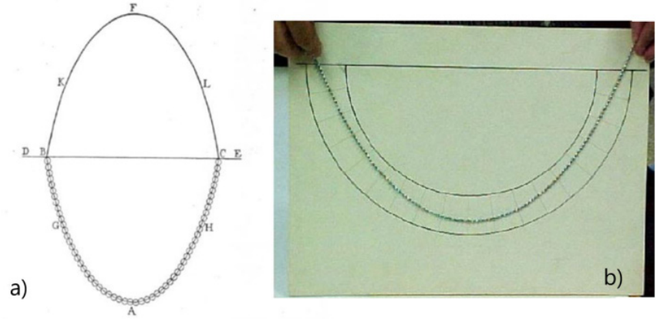


Figura 1. a) Arco catenario y cadena, Heyman, 1966. b) Modelo de cartón. Fuente: Huerta, 2006.

Con respecto al material, ya también se habló de su calidad anisotrópica, son muy importantes la calidad y su ensamblaje, ya que toma ventaja de la compresión, del cuatrapeo y de la estereotomía, de tal forma que, aunque es una estructura formada por bloques pequeños, a su vez forman bloques de mayor dimensión o macrobloques. Con una maqueta tan sencilla como esta que ponemos a los alumnos de un arco,

podemos ver que tiene la misma función estructural que una cadena invertida, aquí está la trayectoria de las cargas. Básicamente, ésa es otra estructura que está dentro de la estructura, ya que no estamos viendo la trayectoria de esas fuerzas. Quien implementa y fundamenta el análisis límite es el ingeniero Jacques Heyman, en 1966; y de los principios básicos que nos habla, uno es de los arcos de fábrica (mampostería). Además, hay un principio de seguridad, el cual afirma que una estructura no se hundirá en ningún caso sucesivo de cargas que atraviese, mientras no viole la condición de cedencia del material. Por ejemplo, en un arco, si es posible dibujar una trayectoria de las fuerzas dentro de este arco o de esta estructura, ésta no colapsará.

Entonces, ¿de qué va a depender esa seguridad? La respuesta es: del espesor que pueda tener ese arco. Por ejemplo, hay un arco límite, y ese arco límite apenas puede alojar una resultante de esas trayectorias, y los puntos tangentes a esas trayectorias formarán grietas (rótulas) en esos puntos, que no necesariamente representan un peligro; pero si hay más de tres rótulas, van a formar un mecanismo de colapso.

Agrietamientos y deformaciones

El primero que deja por escrito los agrietamientos en arcos es el arquitecto Eugène Viollet-le-Duc en 1854, quien los observa en la Basílica de Santa María Magdalena de Vézelay, en Francia. Él describe el mecanismo por el cual la clave de un arco desciende al tener una dispersión de los apoyos; esa deformación la vemos plasmada en estas láminas.

Santiago Huerta (2004) lo sistematiza. Aquí podemos ver que la trayectoria de las fuerzas (que parece una parábola) y son los puntos tangentes los que van a formar grietas. Esa dispersión de los apoyos va a estar relacionada directamente con el descenso de la clave; entonces, a una pequeña apertura de los apoyos, habrá un descenso mayor en la clave formando centros instantáneos de rotación. Con una maqueta muy sencilla (de cartón), se puede observar que al tener esa dispersión aparecen, naturalmente, grietas.

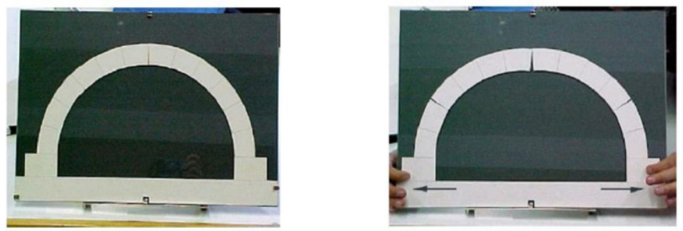


Figura 2. Modelos de cartón. Fuente: Huerta, 2004.

Con respecto a los muros, y a los estribos –que son el sistema de apoyo de los arcos o bóvedas–, en este sencillo esquema (Gordon, 1999) podemos ver que si tenemos solamente apilados los bloques, la carga va a bajar vertical. Sin embargo, al aplicar un empuje lateral, que puede ser una bóveda o un arco, la carga va a ser excéntrica; y dependiendo de esa excentricidad de la carga, se va a ocasionar el giro discreto de estos

bloques hasta llegar al colapso. Ésos son los principios generales que hay que entender sobre el equilibrio.

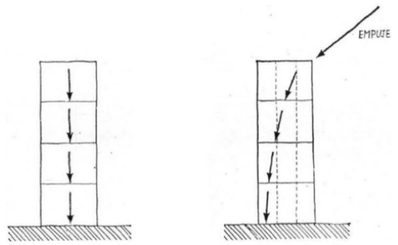


Figura 3. Bloques ante carga axial y excéntrica. Fuente: James E. Gordon, 1999.

Casos de estudio

En los casos de estudio, vamos a hablar del que llegó a la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos a través de Mauricio López. Es un caso emblemático, y muy reciente: el colapso de la bóveda de Calkiní, en Campeche. Se trata de un caso crítico. Un dictamen realizado un año antes mediante modelos matemáticos de elementos finitos, afirmaba que la estructura era segura, y un año después colapsó. Afortunadamente, no hubo ninguna pérdida humana.

Entonces, empezando con el registro de los daños del inmueble mediante levantamiento de escáner láser, se realiza un modelo tridimensional. Esas nubes de puntos son muy útiles ya que nos permiten medir con gran precisión, con un error de prácticamente dos milímetros. El levantamiento es muy preciso. A partir del mismo, se realiza una malla y con estos datos se obtiene mucha información.

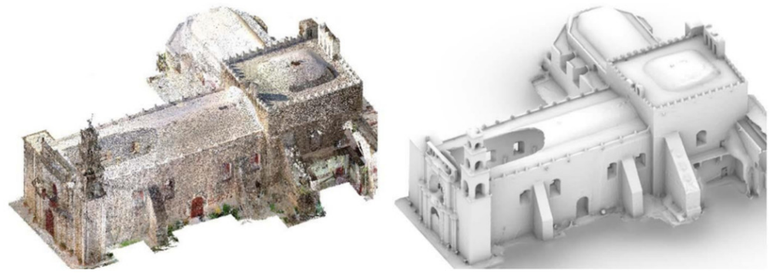


Figura 4. Nube de puntos. Fuente: Mesh, Calkiní, F. Orozco, 2025.

En estos casos es fundamental entender no solamente la nube de puntos, sino saber interpretarla, interpretar lo que estamos viendo. Y en un inmueble, como la mayoría de las personas que trabajan en ellos sabe, no hay prácticamente ningún muro vertical, siempre hay varias deformaciones y datos que no se encuentran visibles. Aquí se muestran algunos resultados del procesamiento de la información –también con ayuda de Marisela González–, para procesar diferentes nubes de puntos. Por ejemplo, se muestra el plano a partir de esos datos, y lo que se puede observar en la planta es que hubo

abertura de vanos en ciertas zonas del templo que originalmente no estaban contemplados; también, una disposición asimétrica de los contrafuertes, lo cual ya empieza a hablar de ciertos problemas con el inmueble. Para una mayor precisión, se hace una serie de seis secciones a distintas alturas, también se pueden cortar esas nubes de puntos y generar planos. Éstos son directamente de la nube de puntos, aquí están las seis de la nave y se puede observar cómo a partir de la sección seis a la sección uno se va distorsionando. Ahora vamos a la interpretación, por ejemplo, de la sección se ve que aún conserva los contrafuertes, se puede observar un desplomo de dos centímetros de los muros de un lado, que es muy poco, y aproximadamente 10 centímetros del otro, y conserva su geometría general, y el contrarresto de los muros está funcionando, se puede ver, en cambio, en comparación la sección uno. También gracias a la arquitecta María José _, quien ha realizado diversos levantamientos antes del colapso y pudimos obtener datos para poder comparar con el colapso. Aquí, en rojo, se ve la geometría real comparada previo al colapso un año antes, se pueden observar estas distorsiones. No basta con observar, hay que saber interpretarlo; ahora podemos ver cómo los centros se desplazaron, es decir se están formando estas rótulas en un mayor número y también hay un desplazamiento de un lado de siete y de 11 centímetros. Esas distorsiones provocaron el descenso de la clave en más de 63 centímetros. Estos descensos no ocurrieron de la noche a la mañana, podemos observar que este inmueble ha tenido intervenciones desde el siglo XVI y las bóvedas fueron construidas en el siglo XVIII, por lo que a lo largo de esas centurias se ha ido distorsionando. (La señal en rojo podría estar representada en imagen.)

Otra sección, la tres, también con la nube de puntos, en 2023, ya se puede observar esa distorsión, siendo ésta la de mayor deformidad porque representa un aumento del claro en 40 centímetros. Estas deformaciones son muy considerables y nos hablan de una tendencia. También coincide con alguna de las zonas más afectadas por la abertura de vanos, que se fueron realizando progresivamente. De igual forma, podemos ver que el patrón de grietas ya está fuera de lo seguro, ya que tenemos la presencia de más de tres rótulas.

Aquí podemos observar la interpretación de los desplomos de cada una de esas secciones donde es más clara la tendencia. En la parte central la distorsión es de hasta 23 y 21 centímetros, y se va reduciendo hacia la parte de contrafuertes y del presbiterio. En cambio, en la zona del coro coincide con la zona de colapso.

Gracias a la nube de puntos también se puede realizar un modelado, una calca en tres dimensiones, ya no solamente en dos. Asimismo, ayuda para elaborar hipótesis de cómo estaba construido, de la geometría que tenía originalmente y obtener mayores datos. De una geometría en tres dimensiones se hace una sección ideal o un modelo, a partir del cual conseguimos los datos principales. Ello porque con las nubes de puntos se registra demasiada información, en la que nos podemos perder. Entonces, es muy importante tener cuidado de cuáles son los parámetros más importantes de la seguridad del inmueble.

En la imagen podemos ver la situación de la sección izquierda, es una hipótesis de la geometría en el momento de su construcción. Tenemos algunos de los datos principales

de lo que es el claro, el ancho del muro, el espesor del muro, del contrarresto, también la flecha que tenía y la curvatura. Realizando un sencillo cálculo de estabilidad, se puede obtener la resultante de las fuerzas en la base del muro, lo cual es relevante por lo que vimos sobre las cargas excéntricas que ocasionan el giro de los muros o de los contrafuertes. Igualmente, hay un concepto denominado coeficiente geométrico de seguridad (cgs) para la base del muro, que es el más crítico en cuanto a la bóveda. El factor de seguridad para una construcción de este tipo, normalmente es de alrededor de 3.5, en ese rango, mayor a 3. En este caso la resultante de fuerzas en la base nos da un coeficiente de 2.6 que aunque bajo, no es suficiente para que se ocasione el colapso, ya que las cargas siguen estando dentro de la mampostería. Sin embargo, al realizar algunas calas se descubrió que, contrario a lo que cuentan las crónicas sobre su construcción acerca de que estaba sobre una base piramidal o una plataforma prehispánica, en esta zona el suelo es bastante más blando. Por tanto, con un suelo blando y una excentricidad de las cargas en la base de los muros, se ocasionó la rotación a lo largo de los años, desde que fue construido, debido a esto se agregaron contrafuertes. Lamentablemente no se hicieron en una disposición simétrica correcta y del lado derecho podemos ver, gracias a la situación actual de la zona que todavía no colapsa (sin contrafuerte), que al perder la curvatura en la zona superior, se fue agregando material. En consecuencia, por tanto peso podemos ver que el empuje, que es el parámetro horizontal más crítico, se aumenta; por lo que del lado izquierdo tenemos 15.75 toneladas de empuje en esta sección, y para la situación actual, sumando el peso y disminuyendo la flecha, aumenta a 43 toneladas. Con ese empuje en esta estructura, se observa que la resultante de las fuerzas está por fuera de la base del muro, eso quiere decir que esta estructura no debería estar en pie.

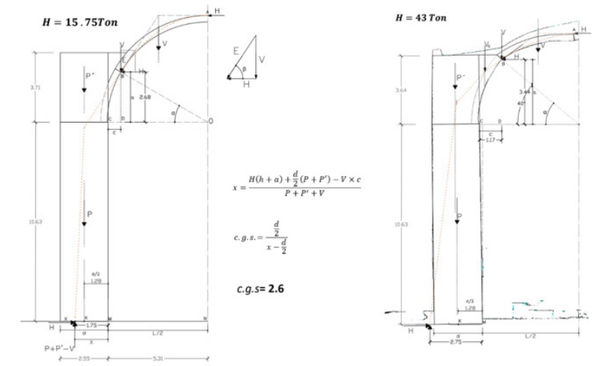


Figura 5. Cálculo de sección ideal y real. Fuente: F. Orozco, 2025.

Lamentablemente, no se verificó antes esta situación. Con un cálculo sencillo de esta naturaleza, se puede verificar que ya estaba en una situación crítica de equilibrio, es decir en un mecanismo de colapso. Podemos ver también esa deformación en la comparación de la nube de 2023 realizando cortes y la de 2025, y justamente la zona con mayores deformaciones es la que finalmente colapsó.

Podemos ver la mampostería en esta ortofoto, obtenida mediante fotogrametría. Hay algo relevante también, que es la disposición de las dovelas que son de un material irregular y no coinciden radialmente a los centros, como normalmente debería ser en una estereotomía correcta, lo cual puede afectar en cuanto a cierto deslizamiento; y en este caso podemos ver los centros desplazados. Esto todavía está en proceso, es tarea para un largo tiempo. Sin embargo, con esos resultados se puede tener una interpretación de las zonas que son inseguras y se deben demoler, así como otras para intervenciones como, por ejemplo, el uso de tirantes de acero para reducir el empuje considerable y poder reconstruir sin ningún problema.

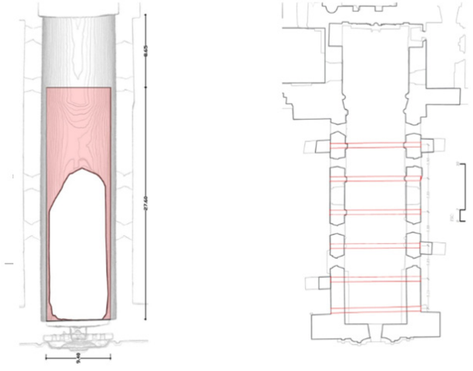


Figura 6. Zona a demoler y tirantes. Fuente: Calkiní, F. Orozco, 2025.

Ahora hablaré un poco de otro caso también reciente en Tenango, este proyecto es con José Ernesto Díaz. Se trata de una bóveda un poco similar (deformada); lo que observamos es casi totalmente fotogrametría. Este caso es la bóveda de un coro, realizando calas se ve que hubo una pérdida de la geometría de la bóveda y una disminución de 20 centímetros en la clave. Aquí está la interpretación de los agrietamientos. Esta imagen es la sobreposición de tres nubes de puntos en diferentes momentos. Con la línea punteada en la sección transversal, se puede ver la curvatura que tenía antes de la intervención, por la cual se decide demoler la zona central y reconstruir con mampostería recuperando esa geometría. Todavía no estaba al borde del colapso, pero existía ya un mecanismo que podría causarlo.

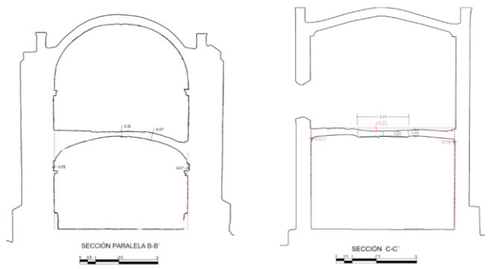


Figura 7. Secciones de Tenango. Fuente: F. Orozco, 2024.

Para finalizar, la figura de la izquierda es la bóveda deformada con la curvatura, que se puede ver a simple vista, y del lado derecho parte del proceso de reconstrucción. Se reintegraron vasijas y diversos elementos, como los rellenos y el piso. En este caso también se usaron gatos para levantar parte de esa curvatura. Pero la idea es ésa, que identificando esas deformaciones a tiempo y corrigiéndolas se puede recuperar la seguridad de una estructura o, inclusive, incrementarla. Hay que tener mucho cuidado con la interpretación y el uso de estos modelos matemáticos, que a veces son como una caja negra; no se incluyen propiedades de los materiales y cierta geometría, pero puede ser difícil de interpretar, y a veces se toma –para bien o para mal– lo que interpreta quien aporta esos datos. Por tanto, se debe tener cuidado, y coincido en que se debe hacer más de un tipo de análisis para alcanzar un resultado adecuado y salvaguardar a las personas.



Figura 8. Fotos de la bóveda deformada y reconstruida en Tenango. Crédito: Fabián Bernal Orozco Barrera.
Año de toma: 2024. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/altqTAJCN3w?si=nxspeC36iE5lOt0C&t=9363*

Fuentes de información

Calafat, M.E. (2004). *Los gozos y las formas. Reflexiones sobre la estética de las formas estructurales*. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Discurso inaugural del año académico 2004-2005, p. 51. *https://rac.es/ficheros/doc/0b9456853f0caf08.pdf*

Castro Barrera, M. del C. (s/f). *Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc: una relectura desde México. Revistas* INAH. *https://revistas.inah.gob.mx*

Viollet-le-Duc, E. (1866). "Restauration", en Bance, B. (Eds.), *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*, París, t. VIII, págs. 14-34. *https://www.cosa-paris.com/restauration-eugene-emmanuel-viollet-le-duc/?lang=en*

Gordon, J. E. (1999). *Estructuras: o por que las cosas no se caen*. Celeste Ediciones, SA.

Heyman, J. (1966). *El esqueleto de piedra*. Instituto Juan de Herrera. Madrid.

Huerta, S. (2004). *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera. Madrid.

Estrategia integral de análisis estructural para la conservación del patrimonio histórico

Dr. Fernando Peña Mondragón

Voy a enfocar mi presentación en explicarles cómo hacemos los análisis estructurales, en vez de mostrar sólo los resultados de lo que hacemos. Creo que una parte muy importante es entender cómo se hacen las cosas.

El trabajo del ingeniero es muy sencillo, lo único que tenemos que hacer es resolver la desigualdad: la Capacidad (C) es mayor que la Demanda (D) [C > D].

Entonces la capacidad siempre tiene que ser mayor que la demanda. Pero lo complejo en el trabajo del ingeniero es evaluar la capacidad y evaluar la demanda. La demanda son todas las acciones sobre la estructura, como peso propio, viento, sismos, hundimientos diferenciales, temperatura, fuego, etc. La capacidad es cómo va a resistir la estructura esas acciones. Entonces, en el momento en que la demanda sea mayor que la capacidad, tenemos la falla y el colapso de las estructuras. Por ejemplo, las iglesias que se dañaron con los sismos de 2017, mostraron que la demanda fue mayor que la capacidad (Figura 1). Así, el trabajo del ingeniero es resolver esta desigualdad, donde la capacidad siempre tiene que ser mayor que la demanda.

a)



b)



Figura 1. Ejemplo de Iglesias dañadas con los sismos de 2017: a) Jiutepec, Morelos; b) Huajuapan de León, Puebla. Crédito: Fernando Peña Mondragón. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Por otro lado, cuando nos dedicamos a la conservación del patrimonio cultural, muchas veces se dice que al ser estructuras antiguas no hay reglamentos de construcción. El ingeniero siempre trabaja con los reglamentos de construcción. Se dice que no hay y por eso son difíciles de analizar. Efectivamente, cuando no hay reglamentos de construcción, existen guías a nivel internacional que nos dan lineamientos básicos de qué es lo que podemos hacer y cómo lo podemos hacer, para preservar el valor cultural. Porque no se trata de intervenir por intervenir para incrementar la capacidad o disminuir la demanda. Tenemos que ir más allá. Tenemos que preservar los valores del patrimonio. Entonces debemos tener un equilibrio entre la conservación y la capacidad.

Para ello, está el Comité Científico Internacional para el Análisis y la Restauración de Estructuras del Patrimonio Arquitectónico (ISCARSAH, por sus siglas en inglés) que depende de ICOMOS. Este Comité da una serie de principios que nos sirven de guía, a nosotros los ingenieros estructuristas para llevar a cabo nuestro trabajo. De forma muy resumida, los principios son: i) Respeto a la autenticidad estructural; ii) Seguridad estructural; iii) Mínima alteración o impacto; iv) Compatibilidad; v) No ser invasivo; vi) Reversibilidad; vii) Remoción; y viii) Monitoreo y control.

El respeto a la autenticidad estructural nos dice que no podemos modificar la estructura original en el sentido de querer que funcione como una estructura moderna; éste es uno de los primeros errores que se pueden cometer. Las estructuras se diseñaron de una cierta forma. Quizá un diseño básico, no como el que actualmente conocemos, pero todas las estructuras fueron diseñadas en su momento. Entonces, tenemos que entender ese proceso de diseño, entender los materiales, las técnicas de construcción y, también, lo que ha sucedido a lo largo del tiempo. Eso se tiene que respetar. Querer que trabaje como una estructura moderna, sería el primer error que podemos cometer, el otro va aunado a la seguridad estructural. Es decir, no por respetar la autenticidad estructural, los vamos a dejar morir. Debemos darle una seguridad estructural para que permanezca a lo largo del tiempo. Porque el patrimonio lo tenemos que heredar a las generaciones futuras.

A partir de ahí, se da otra serie de recomendaciones, precisamente para saber hasta dónde podemos llegar con la intervención estructural, las mínimas alteraciones o impacto, la compatibilidad de elementos, de materiales, etc. Es decir, que sea lo menos invasivo posible. Que pueda haber una reversibilidad y remoción. Sobre todo, que haya un monitoreo y control antes, durante y, cuando sea posible, después de la ejecución, para verificar que la medicina esté funcionando realmente y no causar más daño del que se tenía antes de la intervención.

Dentro de estos principios, el siguiente diagrama de flujo (Figura 2) nos indica cómo podemos seguir estos principios del comité, y lo divide en cuatro puntos interesantes. Los tres primeros son toda la parte del diagnóstico y evaluación del estado de la estructura. Hasta el final entramos a las medidas de intervención.

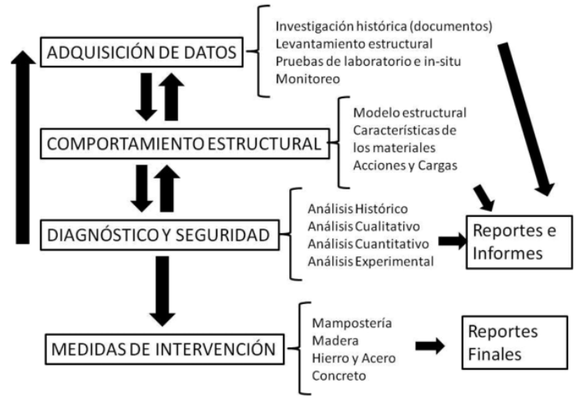


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de intervención de acuerdo con los principios ISCARSAH (modificado de Lourenço, 2012). Fuente: Elaboración propia.

Entonces, si no se hace un trabajo adecuado de diagnóstico, nos podemos perder. No sabremos si el remedio que se le dará a la estructura, será el adecuado. Obviamente, tiene que haber toda una investigación histórica documental. Toda la parte de levantamientos estructurales, pruebas de laboratorio, monitoreo, etc., que estaría contenido en el primer paso: la adquisición de datos. Después viene la parte del comportamiento estructural, dirigido a entender el comportamiento estructural y los modelos estructurales. Los modelos numéricos son una parte. Aquí, cabe mencionar un punto dentro de este gran proceso, que viene a ser otro de los errores comunes: esperar que el modelo numérico nos resuelva la vida. No, el modelo numérico simplemente es uno de los tantos pasos que debemos seguir para llegar a un buen diagnóstico. Muchas veces, el modelo estructural no nos da la respuesta; sino al contrario, simplemente nos confirma o indica si lo que estamos haciendo es correcto o no, cómo será el comportamiento a futuro. Por tanto, tenemos que ver a futuro. Por ejemplo, en el caso de sismos, si hacemos una intervención, debemos saber cómo va a responder durante un sismo futuro. Para saberlo usamos los modelos numéricos, que nos ayudan a determinar ese escenario. Después viene el diagnóstico y la seguridad. Aquí algo interesante. Aparece otra serie de análisis, en especial dos importantes: el cualitativo y el cuantitativo. Por tanto, el modelo estructural es parte del análisis cuantitativo, el que nos da los números, nos da certezas, nos indica cómo va el factor de seguridad, si es adecuado o no. Ahora, con respecto al análisis cualitativo, éste nos va a ayudar a entender la estructura, saber preguntarle qué siente, cómo se siente, dónde está el padecimiento. Todo ello nos va a dar parte de la respuesta. Como resultado, debe haber un equilibrio entre la parte numérica y hacer una buena evaluación cualitativa de la situación. Por ejemplo, cómo está le estructura, si está desplomada, o deformada, si esas deformaciones son de origen, las respuestas nos dirán si hay problemas, qué tipo de problemas, si surgieron después de una intervención, etcétera.

Hay que recordar que la vida útil de estas estructuras se extiende por muchos años. Entonces, a lo largo de la vida ya no se tiene la estructura original porque ha sufrido va-

rias modificaciones, cambios de uso, etc., todo lo cual va alterando la estructura. Estas alteraciones no se obtienen con el modelo numérico, y tampoco con el análisis cualitativo. En consecuencia, se tiene que encontrar un equilibrio entre la parte propiamente numérica y la parte de sensibilidad que debe tener el ingeniero, al revisar la estructura. Una vez obtenido el diagnóstico, ya podemos determinar las medidas de intervención, porque sin diagnóstico no hay intervención porque su papel es fundamental, tanto que en ocasiones es la parte que se lleva el mayor tiempo. Esto puede ser también, en ocasiones, una limitante, en especial cuando hay celeridad por entregar la obra, se requiere ya el proyecto de intervención, porque es lo que se va a contratar, etc. Sin embargo, si no se tiene un buen diagnóstico, se corre el riesgo de tener una mala interpretación y, por ende, un mal proceso de intervención. De ahí la importancia de contar con un buen diagnóstico, sin que importe el tiempo que se requiera para obtenerlo. Al respecto, cabe señalar que de los cuatro puntos propuestos por el procedimiento ISCARSAH, tres son para llegar al diagnóstico. La parte final, el resultado final, es el proceso de intervención, que es lo más importante, y todos los demás estudios son complementarios. El diagnóstico es vital, y a partir de ahí viene la parte de interpretación. El diagnóstico nos va a permitir valorar el inmueble, conocer las condiciones de origen, saber las modificaciones realizadas, entender el comportamiento estructural a partir de los materiales, procesos y diseños constructivos de origen y a lo largo del tiempo, así como su condición al momento de la intervención.

Cuando hablamos de un análisis estructural, va más allá del análisis numérico porque éste es parte primero. Por tanto, el análisis estructural se debe basar en el comportamiento del edificio ante eventos pasados, hacerse con base en su propia historia, y todo eso nos da el análisis cualitativo. Entonces, tenemos que redefinir la palabra "análisis" en ingeniería estructural, ir más allá del análisis numérico, para llegar a entender globalmente el comportamiento estructural del inmueble, desde su origen hasta el momento en que se está revisando. El análisis numérico es importante porque va a corroborar o desechar nuestras hipótesis basadas en el análisis cualitativo, si son correctas o no. Es una especie de brújula, pero hay que saber usarla, en este sentido, el análisis numérico es una herramienta que se debe saber utilizar.

Tenemos muchos métodos de análisis y cada uno nos va a dar diferente información, por lo cual para seleccionar una buena herramienta de análisis tenemos que tomar en cuenta diferentes conceptos. Lo primero es la información disponible. ¿Qué información tenemos? Porque dependiendo de eso, va a ser el tipo de análisis que necesitamos y la información que vamos a necesitar. Existen muchos modelos numéricos que nos pueden dar mucha información, pero requieren de una mayor cantidad de datos de inicio. Si no tenemos acceso a esa cantidad de datos o no los podemos proporcionar de una forma adecuada, el modelo numérico no va a dar resultados adecuados. La información que tenemos es un punto importante y después qué resultados necesitamos. Es decir, el modelo numérico no es la solución. Debemos decirle al modelo qué resultados queremos, qué es lo que estamos esperando de él, un poco haciendo la comparación. Por ejemplo, cuando vamos a un laboratorio médico si decimos quiero un análisis de

sangre, nos responderán: perfecto, pero qué tipo de análisis quiere, qué necesita saber, y esta información se puede obtener a través de un análisis sanguíneo muy particular. Es lo mismo con los modelos numéricos. No se trata de esperar que el modelo numérico nos dé un resultado, si nosotros no tenemos idea de lo que queremos saber, qué resultados esperamos tener.

Otro punto importante es la disponibilidad y compatibilidad. Esto va muy relacionado con la experiencia del ingeniero. Podemos tener modelos numéricos muy avanzados, pero si no tenemos el conocimiento para utilizarlos, no van a servir de nada. O, al contrario, podemos tener modelos simplificados muy básicos, pero si tenemos la experiencia para utilizarlos, para interpretarlos, nos darán resultados adecuados. Como ingenieros, debemos tener también ese grado de sensibilidad, para saber cuál es nuestro grado de conocimiento, qué es lo que podemos aplicar y qué no, si necesitamos otro experto que nos apoye o no, o si tenemos que actualizarnos, lo que también es importante.

Los costos también son esenciales. Cuando hablamos de costos no es solamente el costo económico. Son costos de recursos, tanto humanos como de tiempo. Hacer un modelo numérico no es solamente el tiempo de computadora, implica cuestiones como ¿cuánto tiempo tardas en hacer el modelo?, ¿cuánto tiempo te llevas en obtener toda la información que requieres?, ¿cuánto tiempo te tardas en estar seguro que ese modelo te va a dar un resultado adecuado? Después de eso, viene toda la parte de interpretación, cuánto tiempo te vas a llevar en esa fase. Entonces, la parte de costos involucra costos y tiempos. Debemos preguntarnos, ¿tenemos el tiempo para hacer un modelo muy complejo? En ocasiones hay proyectos en los que no se tiene ese tiempo. Quizá en la investigación sí se cuenta con más tiempo, y tal vez se puedan invertir dichos tiempos, porque la validación del modelo es fundamental. Una de las ventajas con las estructuras existentes es que tenemos a quién preguntarle si nuestro modelo va por buen camino. Uno de los pasos fundamentales al hacer un modelo numérico, es hacer el análisis de las condiciones actuales de la estructura y confrontarlo con la realidad. Si el modelo me da la realidad, es un buen modelo, si no es compatible con la realidad, se desecha. Lo que está mal es el modelo, no la realidad. Muchas veces el ingeniero tira la realidad y dice "no es mi modelo, está bien hecho. No, yo no sé por qué la estructura esté así, pero mi modelo está bien hecho". Entonces eso es fundamental. En la literatura hay muchísimos modelos dependiendo de los usos para qué los queremos. Para casos genéricos, para estudiar centros históricos o si queremos usarlos para cosas particulares. Tenemos diferentes cantidades y tipos de modelos numéricos. Por ejemplo, D'Altroy y colaboradores, en un artículo muy interesante, hacen un resumen de varios modelos numéricos que encuentran en la literatura con diferentes metodologías e hipótesis. Todos son válidos, pero aquí cabe la pregunta: ¿cuál vamos a utilizar? La respuesta es sencilla: el que yo sepa utilizar. En primer lugar, el que yo sepa cuáles son sus hipótesis, que se va a cumplir y demás.

Un ejemplo, para aterrizar estas ideas. Ésta es la presa de El Cajón, en Querétaro, (Figura 3). Es una presa de mampostería del siglo XVII. Una de las ventajas de las presas de mampostería es que su diseño tradicional es por gravedad, es decir, es equilibrio de fuerzas, el empuje del agua se tiene que resistir por su propio peso (Figura 4). Es una estruc-

tura muy bonita, muy sencilla, es estática pura. Al hacer el procedimiento de estática pura, donde la resultante de las reacciones tiene que ir cayendo en el tercio medio de toda la sección de la presa, si la resultante cae dentro del tercio medio, quiere decir que es estable; si cae fuera, no quiere decir que se volteé, pero sí que va a empezar el agrietamiento por las fuerzas de tensión que se van a presentar. Esos agrietamientos permiten el paso del agua, filtraciones que ponen en riesgo la estructura.

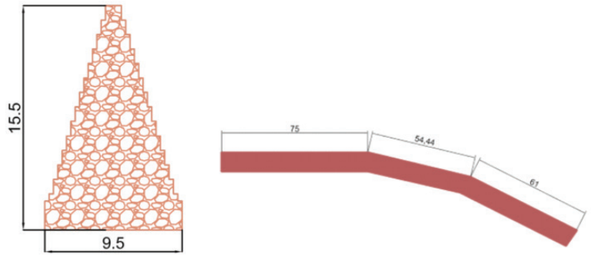


Figura 3. Dimensiones y geometría de la cortina, dimensiones en m. Fuente: Elaboración propia.

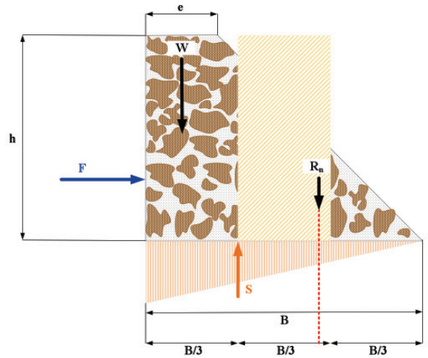


Figura 4. Fuerzas actuantes y resistentes en una presa de gravedad. Fuente: Elaboración propia.

Cuando se revisó con los métodos tradicionales, se ve que la resultante caía por fuera del tercio medio (Figura 5), situación que prendió los focos de alarma. Pero cuando se revisó la presa, estaba en perfectas condiciones. No había filtraciones de agua, ni algún indicio de que estuviera en peligro. Aquí fue donde tiramos el modelo numérico a la basura, porque no estaba reflejando la realidad. Tuvimos que requerir un método más complejo. En consecuencia, hicimos un análisis paramétrico con un modelo de elementos rígidos y resortes, que permitió no solamente calcular los esfuerzos y las deformaciones, sino también ver dónde estaban las zonas de agrietamientos. Entonces ocurrió algo interesante, cuando replicamos las condiciones del método estático, en el cual decíamos que la mampostería no resiste tensiones, teníamos un volteo, la imagen superior. El caso era crítico, pero al considerar un poco de resistencia de tensión a la mampostería, la presa se volvía perfectamente estable, sin ningún problema (Figura 6). En este ejemplo encontramos otras cosas. Muchas veces formulamos la hipótesis, que es válida en el 99

por ciento de los casos, que la mampostería no resiste tensiones. Pero físicamente sí las resiste. Por tanto, para este caso en particular de la presa, el tener el valor de la resistencia a tensión era fundamental. Y es ahí donde el modelo numérico nos va guiando, para saber cuál es el camino adecuado para interpretar el resultado y la conservación de este elemento en particular.

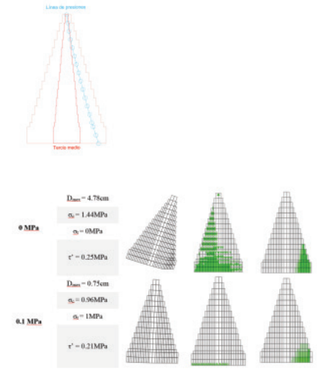


Figura 5. Línea de presiones. Fuente: Elaboración propia.

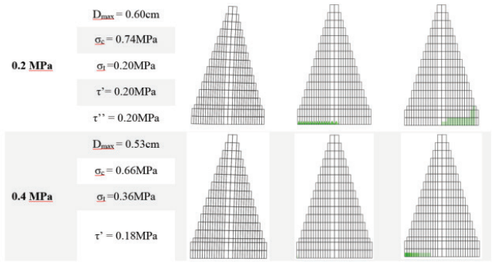


Figura 6. Análisis paramétrico utilizando el método de los elementos rígidos. Fuente: Elaboración propia.

En conclusión, diríamos que el diagnóstico tiene que ser esencial. No podemos empezar con el proyecto de intervención si no tenemos un diagnóstico. Es la base fundamental para una buena evaluación de la seguridad estructural. El análisis no solamente es un análisis numérico, tiene que ir más allá, tiene que haber un análisis cualitativo y uno cuantitativo. Debemos contar con evidencia del comportamiento de la estructura a lo largo del tiempo, en este momento y en el futuro.

Conferencias Magistrales

20 de febrero de 2025







Moderador: **Mtro. Mauricio Jessurun Solomou**
Presidente del XL Consejo Directivo del Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM)

Secretario: **Mtro. Luis Rojas Nieto**
Vicepresidente de la Asociación Alumni México Francia

Para mayor detalle escanea el código QR y podrás ver la transmisión completa de esta sección del Encuentro México y Francia

Crédito: CICM-Imagen en evento. Esta página





Notre Dame, la ciencia en acción

Dr. Pascal Liévaux
Jefe de la Delegación de Inspección, Investigación e Innovación, y jefe del Departamento de Investigación, Valoración y Patrimonio Cultural Inmaterial del Ministerio de Cultura de Francia (MJS)





Las herramientas tecnológicas en apoyo al salvamento arqueológico del Tren Maya

Dr. Manuel Eduardo Pérez Rivas
Responsable académico del Proyecto de Salvamento Arqueológico del Tren Maya

Rest. Félix Albano Camacho Zamora
Coordinador del Área de Conservación del Proyecto de Salvamento Arqueológico del Tren Maya

Nota: Imágenes con enlace Web fueron transmitidas por INAH TV durante el evento realizado en el Auditorio Jaime Torres Bodet (Museo Nacional de Antropología).

Crédito: CICM-Imagen en evento. Esta página



Crédito: EE-Laura Nayeli Guerrero Barajas

Buenos días. Bienvenidas y bienvenidos al Auditorio Jaime Torres Bodet del Museo Nacional de Antropología, en la Ciudad de México, uno de los recintos culturales más importantes de México y el mundo.

Es un honor iniciar esta segunda jornada del Encuentro México y Francia, Innovación y uso de la tecnología en la conservación del patrimonio cultural.

Antes de presentar la conferencia magistral de esta mañana, quiero reflexionar con ustedes sobre el concepto de "encuentro", que da nombre a este evento. Un encuentro como éste, representa mucho más que una reunión de especialistas; es la convergencia de perspectivas, disciplinas, instituciones y países, con un propósito común: la conservación, restauración y rescate del legado cultural que define nuestra historia e identidad.

Este espacio de diálogo entre México y Francia, ha sido una oportunidad invaluable para compartir experiencias y conocimientos sobre el uso de la tecnología en la protección del patrimonio cultural.

Ayer, en una jornada de trabajo intenso, se abordaron temas fundamentales como los desafíos actuales en la conservación del patrimonio en ambos países, la gestión de riesgos, la instrumentación del patrimonio cultural y la aplicación de tecnologías innovadoras, como la digitalización, la fotogrametría y el análisis estructural mediante nubes de puntos. Estas sesiones demostraron que el trabajo multidisciplinario e interinstitucional, unido a la colaboración internacional, abre nuevas posibilidades y aporta soluciones concretas a los retos de la conservación del patrimonio cultural, y prácticamente en cualquier iniciativa

Hoy, en nuestro segundo día de actividades, continuaremos con conferencias y paneles temáticos, igualmente fascinantes. Iniciaremos con la presentación de Pascal Liévaux, jefe adjunto de la Delegación de Inspección, Investigación e Innovación, y jefe del Departamento de Investigación, Valoración y Patrimonio Cultural Inmaterial del Ministerio de Cultura de Francia, quien nos hablará sobre los retos científicos de Notre Dame en su restauración. Posteriormente, contaremos con la participación de los especialistas mexicanos del Instituto Nacional de Antropología e Historia: Manuel Eduardo Pérez Rivas, de la Dirección de Salvamento Arqueológico del INAH, y Félix Albano Camacho Zamora, de la Sección de Conservación del Centro INAH Campeche, quienes compartirán su experiencia sobre las herramientas tecnológicas en apoyo al salvamento arqueológico del Tren Maya.

La Catedral de Notre Dame de París no es solo un monumento arquitectónico, es también un símbolo de la historia y el alma de Francia, testigo de siglos de eventos históricos, culturales, religiosos, políticos y sociales. Su restauración, tras el devastador incendio del lunes 15 de abril de 2019, representó un reto sin precedentes que convocó y unió a expertos de diversas disciplinas y países, en un esfuerzo por devolverle su esplendor.

De manera similar, para México, la cultura maya es un testimonio de la grandeza de nuestra historia, un legado vivo que aún nos habla a través de sus ciudades antiguas, inscripciones y tradiciones. La misión arqueológica asociada al Tren Maya es una tarea que combina tecnología de punta, conocimiento especializado y pasión por el trabajo cultural, para preservar y comprender mejor nuestra herencia prehispánica, fundamental en la formación de nuestra identidad nacional.

Desde el Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM), que me honro en presidir y representar, queremos expresar nuestro orgullo por ser parte de este Encuentro, junto con el Instituto Nacional de Antropología e Historia, la Embajada de Francia en México, la Embajada de México en Francia, el Colegio de Ingenieros Civiles del estado de Puebla, la Universidad Cergy de París y la Asociación Alumni México Francia. Esta colaboración internacional fortalece nuestra capacidad para enfrentar los desafíos de la conservación patrimonial, con soluciones innovadoras y sostenibles.

La protección del patrimonio cultural de México y Francia cuenta con aliados extraordinarios, como lo hemos constatado en cada sesión y conferencia de este encuentro. Podemos sentirnos orgullosos de la contribución que cada uno de los aquí presentes hace para esta causa. Nuestro futuro estará mejor cimentado si trabajamos juntos para conservar el legado de quienes nos antecedieron, asegurando que las generaciones futuras también puedan maravillarse con la riqueza cultural que define a nuestras naciones.

Para iniciar, voy a presentar al ingeniero Luis Rojas Nieto, quien además de representar a la Asociación Alumni México y ser uno de los impulsores determinantes para lograr la realización de este evento, también es expresidente del Colegio de Ingenieros Civiles de México y un destacado colega con quien he tenido la oportunidad de coincidir en grandes proyectos de colaboración y difusión del conocimiento, en los que ha estado presente el gremio de la ingeniería civil mexicana.

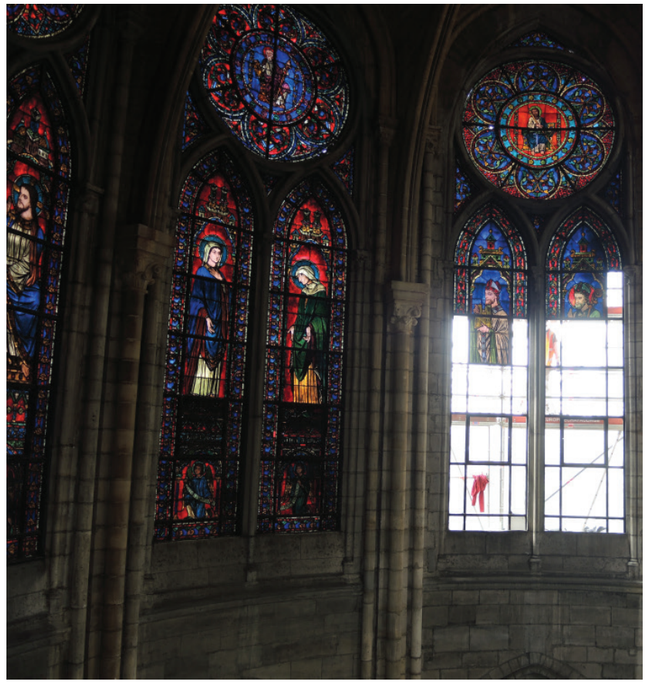
Asimismo, quiero hacer un reconocimiento a la maestra en arquitectura Valeria Valero y por supuesto a mi amigo Luis Rojas, quien fue un motor de trabajo en la organización

de este encuentro, cuidando absolutamente todos los detalles que, como ustedes se imaginarán, son muchísimos, para lograr una reunión de esta calidad.

Muchas gracias a todos.

Moderador: **Mtro. Mauricio Jessurun Solomou**









*Fotografías tomadas de presentación compartida para el Encuentro por parte de Pascal Liévaux.

Conferencia Magistral
Notre Dame, la ciencia en acción

Dr. Pascal Liévaux

Los monumentos históricos, en particular los grandes monumentos religiosos de la Edad Media, son objeto de estudios científicos desde hace varias décadas. Desde la historia del arte hasta la ingeniería y la arqueología, sus realidades materiales e inmateriales, incluso a través de enfoques digitales, han sido estudiadas desde diferentes ángulos por equipos de investigadores procedentes de diferentes instituciones en Francia y el resto de Europa. Las problemáticas abordadas son muy variadas: arquitectura, sistemas constructivos, cronología y aprovisionamiento de los astilleros, gestos técnicos de los artesanos, programas decorativos, conservación que incluye enfoques diversos como la arqueología del edificio, el estudio de las estructuras, los riesgos sísmicos y climáticos, la acústica, el análisis estilístico, etnológico, la digitalización, entre otros. Los programas de investigación que abordan todas estas cuestiones, se financian mediante convocatorias de proyectos lanzadas por diversos organismos nacionales y europeos de apoyo a la investigación en el ámbito de las ciencias del patrimonio cultural.

Pero con el incendio de la Catedral de Notre Dame de París el 15 de abril de 2019, y sobre todo el formidable trabajo de restauración que siguió rápidamente a la catástrofe, es, por lo que sabemos, la primera vez en Francia, y tal vez en Europa, que tantas fuerzas científicas, tantas disciplinas diferentes y complementarias, se reunieron para estudiar un monumento patrimonial, con una coordinación y financiación aseguradas por dos instituciones, el Centro Nacional de la Investigación Científica (CNRS), por un lado, y el Ministerio de Cultura de Francia, por otro.

Este impulso institucional excepcional en favor de la investigación pública, se inscribe en el marco de la emoción que invadió a Francia y al mundo entero tras la amenaza de desaparición de un monumento emblemático del patrimonio mundial. El resultado fue un proyecto científico que reunió durante cinco años, de 2019 a 2024, a más de 170 investigadores y personal de apoyo a la investigación de diferentes instituciones de investigación francesas e internacionales (CNRS, Ministerio de Cultura, Universidades, CEA, grandes escuelas, etc.). En este contexto, se han financiado y desarrollado 12 doctorados en torno a los diferentes aspectos de la investigación sobre Notre Dame.

La fuerza de este proyecto científico descansó en su aspecto holístico, expresado a través de los nueve grupos de trabajo establecidos (madera-marco, piedra, vidrio-vidrieras, metal, estructura, decoración monumental, acústica, datos numéricos, emoción y movilización). Estos grupos interdisciplinarios no trabajaron en paralelo y por separado,

sino que, al contrario, intercambiaron constantemente, a través de reuniones de trabajo regulares, seminarios y eventos científicos. El proyecto científico también se llevó a cabo en estrecha interacción con otras entidades del Ministerio de Cultura francés (Dirección Regional de Asuntos Culturales, Establecimiento Público para la restauración de Notre Dame de París, arquitectos en jefe de los monumentos históricos, Instituto Nacional de Arqueología Preventiva, entre otros).

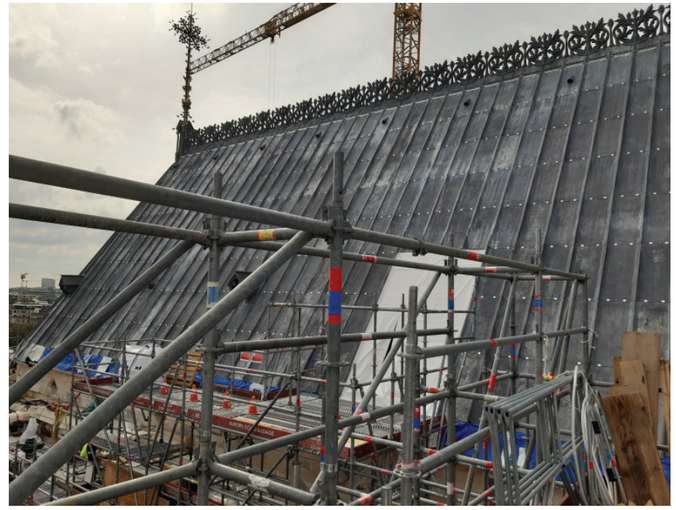
En este espíritu global, el proyecto creó una dinámica rara y constante que, además, se benefició de la acogida benevolente de los arquitectos jefes encargados de la restauración, Philippe Villeneuve, asistido por Pascal Prunet, y Rémi Fromont, y del Establecimiento Público para la restauración de Notre Dame de París. Este último abrió a los científicos, las puertas de la obra excepcional de la que tenían la responsabilidad, permitiéndoles acceder a todas las partes del edificio, enriquecer y renovar completamente el conocimiento de un monumento, paradójicamente, poco estudiado debido a su lugar eminente en la historia de la arquitectura y en el patrimonio mundial. El proyecto científico se apoyó en las metodologías establecidas en anteriores investigaciones llevadas a cabo por la comunidad, pero también con el desarrollo de otras nuevas en muchos campos.

Desde los primeros días que siguieron al incendio hubo que afrontar, ante todo, la cuestión crucial del destino de los elementos del techo y de las bóvedas derrumbadas. Estos miles de elementos no fueron tratados como escombros que debían ser evacuados con urgencia, sino como artefactos procedentes de una excavación arqueológica. Estos restos fueron inventariados, fotografiados y almacenados para ser estudiados en un futuro cercano o lejano. Esta etapa ha sido decisiva para la viabilidad de numerosos estudios científicos.

A este respecto, cabe mencionar el conjunto de los nueve grupos de trabajo.

Al analizar los restos de la madera caída a tierra o sobre el riñón de las bóvedas, los miembros del grupo de trabajo Bois-Charpente pudieron enriquecer los conocimientos históricos sobre la edad y la procedencia de las maderas, pero también extraer datos ambientales valiosos para la comprensión del calentamiento climático u "óptimo climático medieval", y por lo tanto del calentamiento climático actual. Combinaron datos arqueológicos e históricos. También resaltaron los desafíos y beneficios del uso de vigas de roble y maderas verdes en la construcción de estructuras medievales, aclarando así la decisión de reconstruir la misma estructura.

Los investigadores del grupo de trabajo sobre metales, pusieron en evidencia la compleja diversidad de los metales (hierro y plomo) integrados en la estructura y en la mampostería de la catedral. Resaltaron la increíble estructura metálica de la catedral, diseñada por los constructores de la Edad Media, pero también el papel del plomo en las diferentes épocas de la construcción, explorando las prácticas históricas de moldeado, de ensamblaje y reciclaje, realizados a lo largo de los siglos. Otros trabajos permitieron analizar la contaminación por plomo en los monumentos históricos estableciendo, sobre todo, comparaciones esclarecedoras entre Notre Dame de París y la cercana Sainte-Chapelle.



*Fotografía tomada de presentación compartida para el Encuentro por parte de Pascal Liévaux.

Paralelamente a esta exploración, el grupo de trabajo sobre la piedra y el mortero sacó a la luz los materiales de Notre Dame y las técnicas de construcción de las bóvedas góticas, dando una visión clara de los métodos de construcción de la catedral gracias a un análisis arqueológico detallado, en particular sobre las bóvedas del arco derrumbado, profundizando así nuestra comprensión de las técnicas de construcción de dichas bóvedas góticas. Otros investigadores se centraron más particularmente en el análisis de los morteros y sus propiedades físico-químicas, conocimientos que podrán ser utilizados en otros sitios de restauración.

Este relato material fue completado por el grupo de trabajo Verre-Vitrail, que se inclinó sobre las bahías de Notre Dame, todas milagrosamente salvadas por el incendio. También exploraron métodos innovadores de conservación-restauración para la limpieza de las vallas sucias; además, aprovecharon la colocación de todos los vitrales para realizar una crítica de autenticidad, que permitió comprender mejor las diferentes modificaciones y restauraciones realizadas a lo largo de los siglos.

Gracias a los andamios de la obra de restauración, los investigadores del grupo de trabajo sobre la decoración pudieron investigar el edificio como nunca antes, e identificar huellas de la policromía de la Edad Media en las elevaciones, pero también en los restos del biombo de coro o biombo del presbiterio (*jubé*) extraídos de la excavación arqueológica puesta en el cruce del transepto, o nave transversal. También estudiaron la rica decoración pintada en las capillas en el siglo XIX, durante la intervención del arquitecto Eugène Viollet-le-Duc, con motivo de su limpieza y posterior restauración.

Pasando de la esencia material al comportamiento del edificio, el grupo de trabajo sobre las estructuras cuestionó la integridad arquitectónica de Notre Dame después del incendio. Mezclando tradición e innovación, realizó un análisis estructural completo de las bóvedas de la catedral, fusionando enfoques complementarios. Paralelamente,

los investigadores se concentraron en la mecánica y las tecnologías medievales de las estructuras de madera, abriendo perspectivas útiles para la restitución de la estructura. Otros investigadores se interesaron por los efectos del fuego sobre la estructura y las modalidades de una buena prevención de este tipo de riesgo.



*Fotografía tomada de presentación compartida para el Encuentro por parte de Pascal Liévaux.

Esta exploración estructural encontró su contraparte acústica en las reflexiones del grupo de trabajo dedicado a este aspecto del monumento. Implementando los métodos innovadores de lo que ahora se llama "arqueología del sonoro", emprendieron un viaje a través del tiempo restituyendo los ambientes sonoros de Notre Dame en las diferentes épocas de su historia. Se trataba también, gracias a las captaciones, de recuperar el ambiente acústico del edificio antes del incendio. Además, constituyeron un archivo sonoro del sitio de restauración, registrando los sonidos producidos en el sitio por los diferentes actores (artesanos, obreros, etc.).

Entre lo material y lo inmaterial, los profundos latidos emocionales que resuenan en Notre Dame, fueron cartografiados por el grupo de trabajo sobre las emociones patrimoniales. Los investigadores de este grupo pusieron en evidencia los vínculos emocionales, sociales y culturales, que unen a la humanidad con la catedral, pintando un cuadro vivo de las interacciones e historias tejidas entre sus paredes. Como conclusión de este viaje introspectivo, ampliaron su tema a otras catástrofes patrimoniales, como el incendio del Museo Nacional de Río de Janeiro, en Brasil, desde la fase de duelo hasta el camino esperanzador hacia la reconstrucción y el futuro.

Completando este viaje caleidoscópico, el grupo de trabajo sobre datos digitales ha tejido los hilos de la historia con la innovación digital, asegurando que los resultados de la investigación multidisciplinaria en Notre Dame, sean ampliamente accesibles y se guarden de forma duradera. Para ello, ha desarrollado una plataforma digital diseñada para el trabajo colaborativo y la integración de los diversos datos científicos produci-

dos por los investigadores. Por ejemplo, desarrollaron técnicas específicas de fusión de datos 2D/3D para el análisis comparativo de los arcos, antes y después del incendio. Por último, este grupo de trabajo abordó el gran desafío de la recopilación, asimilación e interpretación del amplio abanico de datos, para la reconstrucción virtual del "bosque" de la catedral, es decir de la estructura de vigas de madera que se encontraba bajo el tejado.

En conjunto, estas diversas investigaciones, que van desde el enfoque material a los campos de la informática, de las huellas sonoras a los paisajes emocionales, son una ilustración de la diversidad de las ciencias del patrimonio que asocian aquí, una docena de campos disciplinarios. Constituyen una reserva excepcional de conocimientos, que podrán ser utilizados para futuros proyectos de investigación y restauración. Este excepcional proyecto científico ha contribuido significativamente a la consolidación del ecosistema nacional de investigación sobre el patrimonio. Es por ello que el CNRS y el Ministerio de Cultura, respondiendo al deseo de los investigadores, han decidido continuar esta dinámica aplicando los mismos métodos de investigación a otros grandes proyectos de restauración, en curso y futuros.

Conferencia Magistral
Las herramientas tecnológicas en apoyo al salvamento arqueológico del Tren Maya

Dr. Manuel Eduardo Pérez Rivas
Rest. Félix Albano Camacho Zamora

El uso de la tecnología como herramienta dentro del trabajo de conservación y preservación del patrimonio cultural representa un desafío considerable. En el caso específico del salvamento arqueológico, este reto se ve amplificado por las características particulares de las obras de infraestructura, como es el caso del Tren Maya, cuyo carácter de gran extensión e intensidad de la obra generaron múltiples desafíos de trabajo. El reto no sólo fue técnico y logístico, sino también metodológico, lo cual resalta la importancia de aplicar herramientas tecnológicas en las labores de investigación y conservación del salvamento arqueológico, que constituyen investigaciones sujetas a severas restricciones de espacio y tiempo.

Uno de los ejes principales del proyecto fue la implementación de una metodología interdisciplinaria para poder intervenir más de mil 523 kilómetros de terreno en la región maya, gran parte del cual era poco conocido hasta ahora. El proyecto se insertó sobre una vasta muestra territorial con evidencia de ocupación humana, lo que demandó una estrategia integral de registro con el objetivo de documentar la totalidad de los vestigios arqueológicos. Ahora tenemos la certeza de la enorme densidad de la ocupación arqueológica en las diferentes regiones por las que atraviesa el tren. Como resultado de los trabajos, se identificaron y catalogaron más de 66 mil monumentos arqueológicos, entre ellos más de 62 mil inmuebles de distintas características, de los cuales más de 23 mil fueron intervenidos mediante operaciones de registro y exploración.

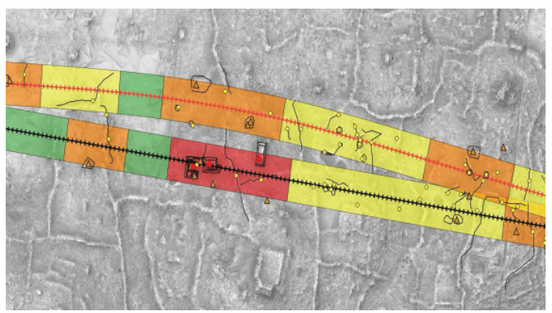


Figura 1. Catalogación de zonas de monumentos por importancia y cambio de trazo, tramo 7. Fuente: Laboratorio de análisis geoespacial, Proyecto Salvamento Arqueológico del Tren Maya. Año de toma: 2022. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/X0iYKsfRGZw?si=QE3gARiuUD99L3se&t=3007*

Para comprender los resultados y desafíos enfrentados es necesario subrayar que el Tren Maya, como cualquier otra obra de infraestructura, se desarrolla en un entorno de enorme densidad patrimonial. Esto planteó un reto crucial que debe ser considerado no sólo en esta región, sino en todo el territorio nacional. El salvamento arqueológico es concebido como un recurso institucional fundamental para atender el patrimonio cultural en riesgo, particularmente por obras de infraestructura. Por ello, resulta indispensable contar con una metodología completa y definida para hacer un diagnóstico preciso de los monumentos de acuerdo con sus características, y planificar y ejecutar las intervenciones arqueológicas.

A lo largo del trazo del Tren Maya se ha confirmado la presencia constante de vestigios mayas, lo que evidencia una práctica de asentamiento altamente planificada y adaptada a las condiciones geográficas y contextuales del entorno. La planificación territorial de los antiguos mayas es una lección vigente de planeación urbanística, conocían a detalle la topografía, los recursos hídricos y la vegetación, y empleaban técnicas como camellones, albarradas y terrazas para optimizar sus asentamientos y cultivos. Gracias a las investigaciones realizadas durante el salvamento, se identificó que aproximadamente el 90 por ciento del trazo del proyecto atraviesa zonas continuas con vestigios arqueológicos de diversas magnitudes, lo que obligó a realizar diagnósticos para determinar áreas de muy alto valor patrimonial inviables para la obra y proponer rutas alternas, todo ello en beneficio de la conservación patrimonial.

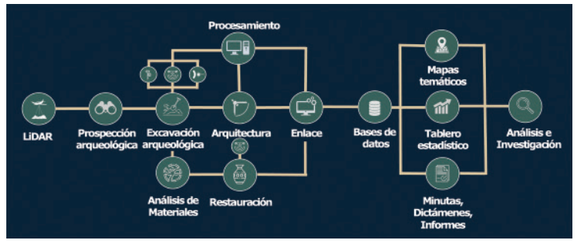


Figura 2. Esquema de organización de las áreas dentro del Proyecto Salvamento Arqueológico del Tren Maya. Fuente: Cecilio Javier Cortés Corre. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/X0iYKsfRGZw?si=u0zyAQZhSgDf3u-Z&t=3215*

En este contexto, se diseñó una metodología interdisciplinaria e integral que compaginó el trabajo de arqueólogos, antropólogos físicos, restauradores, topógrafos, geómatas, ingenieros, geólogos y geógrafos. Este equipo multidisciplinario implementó un sistema de registro y documentación, el cual fue el centro de las acciones enfocadas en la protección patrimonial. El flujo de trabajo comienza con un diagnóstico basado en tecnología LiDAR (*Light Detection and Ranging*), seguido de prospección arqueológica y excavación. En esta última etapa se incorpora el trabajo arquitectónico (alzados y perfiles) y el respaldo los contextos explorados en 3D, mientras que los enlaces de geomática sistematizan la información para conformar bases de datos, estadísticas, informes legales y productos de investigación y difusión. Paralelamente, se desarrolla el procesamiento de bienes culturales a través de laboratorios especializados en cerámica, lítica, malacología, antropología física y conservación.

Respecto a la tecnología LiDAR, funciona a partir del barrido de puntos láser sobre el terreno, lo cual permite obtener datos detallados de los vestigios aun bajo vegetación densa, convirtiéndose en una herramienta esencial en el salvamento arqueológico. Esta tecnología posibilita una detección y aproximación inicial a los elementos arqueológicos, que luego se verifican en campo, permitiendo incluso proponer variantes de trazo para preservar zonas sensibles.

Un ejemplo significativo es el sitio denominado Garra de Jaguar en la costa de Quintana Roo, cuya protección se logró gracias al análisis de datos LiDAR que justificaron una modificación del trazo original del tren, para su preservación. Estas decisiones, aunque complejas en el ámbito de la construcción, fueron posibles gracias a la disponibilidad de información precisa y bien documentada sobre el patrimonio cultural al interior de estas cavidades naturales.

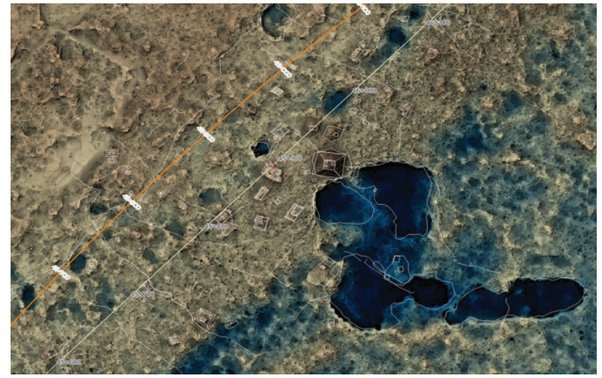


Figura 3. Levantamiento LiDAR del sitio Paamul II, tramo 5 sur. Fuente: Laboratorio de análisis geoespacial, Proyecto Salvamento Arqueológico del Tren Maya. Año de toma: 2024. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/X0iYKsfRGZw?si=IbiBN27OkiE-d140a&t=3409*

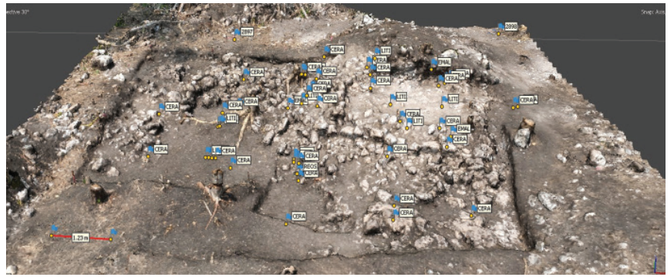


Figura 4. Levantamiento integral *in situ* mediante colocación de puntos georreferenciados. Fuente: Laboratorio de análisis geoespacial, Proyecto Salvamento Arqueológico del Tren Maya. Año de toma: 2025. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/X0iYKsfRGZw?si=tD7QmLKa9naXH0q2&t=3510*

En cuanto al proceso de excavación, las herramientas tecnológicas apoyan al arqueólogo en su labor cotidiana: registro estratigráfico tridimensional, registro de materiales y etapas constructivas. En esta labor, la fotogrametría y la topografía digital han agilizado notablemente estas tareas. Es así como, en campo, cada hallazgo fue registrado con estaciones totales o equipos RTK, permitiendo una georreferenciación precisa que,

integrada a modelos tridimensionales, facilita el análisis y actualización constante de los datos, además de aportar una base sólida para la interpretación de contextos arqueológicos. Los datos extraídos facilitan la identificación de etapas constructivas y colapsos, y de manera integral los sistemas de construcción arquitectónicos, incluidos los elementos conservados *in situ*.

Una parte esencial de la metodología es la generación de modelos tridimensionales mediante fotogrametría a partir de vuelos de dron y fotografía terrestre. Esta técnica fue aplicada prácticamente sobre todos los monumentos intervenidos, generando representaciones virtuales que constituyen una herramienta de análisis y un respaldo digital del patrimonio, que puede ser revisado y consultado en múltiples ocasiones.

Estos levantamientos se replican de igual forma sobre los hallazgos de contextos especiales, entierros y ofrendas, los cuales al ser descubrimientos relevantes son fuente de información primordial del contexto arqueológico. Por ejemplo, mediante este registro por fotogrametría es posible aportar las herramientas necesarias para que el antropólogo físico pueda realizar medidas y análisis sobre el modelo digital, lo que nos aporta información de los restos óseos, aun cuando las condiciones de conservación física de los restos sean muy pobres.

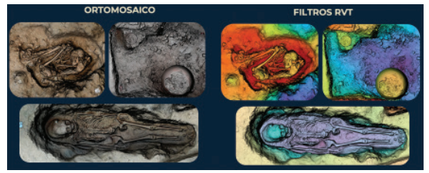


Figura 5. Ortomosaicos y aplicación de filtros RVT (Relief Visualization Tools) obtenidos del registro fotogramétrico de tres contextos especiales. Fuente: Laboratorio de procesamiento, Proyecto Salvamento Arqueológico del Tren Maya. Año de toma: 2025. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/X0iYKsfRGZw?si=fh_cECQKWQhp1yux&t=3726*

Por otro lado, el uso de escáneres 3D ha sido crucial para documentar espacios de difícil acceso, como cuevas o estructuras con intervención de conservación. Como ejemplo se encuentra la documentación que se realizó en el sitio Garra de Jaguar, el cual consta de un complejo sistema de cuevas donde hay vestigios asociados, además del patrimonio natural, en donde se hizo un registro de toda el área cercana al lugar de trabajo de la obra.

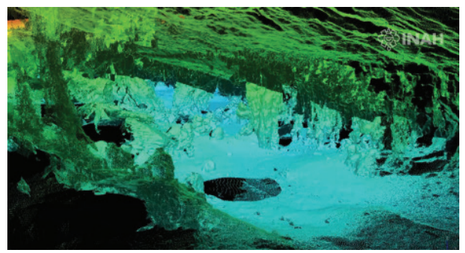


Figura 6. Resultado del escaneo láser del sitio Garra de Jaguar. Fuente: Laboratorio de procesamiento, Proyecto Salvamento Arqueológico del Tren Maya. Año de toma: 2024. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/X0iYKsfRGZw?si=v5NnPVi27paz-5CxI&t=3814*

Gracias a los resultados de los registros ha sido posible generar productos no sólo para investigación, sino también para la difusión de los trabajos de excavación dentro del proyecto. Por ejemplo, en los recorridos virtuales creados mediante la unión de los modelos generados por etapas de excavación, gracias a la edición es posible mostrar de manera didáctica las etapas de intervención, liberación de cuartos, cistas y sus contextos especiales, manteniendo toda la información del contexto arqueológico.



Figura 7. Estructura T7_09029 durante el proceso de consolidación, así como su escaneo 3D mediante estación Trimble SX10. Fuente: Laboratorio de procesamiento, Proyecto Salvamento Arqueológico del Tren Maya. Año de toma: 2025. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/X0iYKsfRGZw?si=UEVwFOW62c25l6NM&t=3771*

En el caso de los bienes muebles recuperados, frente a la magnitud del proyecto, el área de conservación integró herramientas tecnológicas ya usadas en campo para complementar el registro en laboratorio. Se identificaron cuatro procesos principales donde la tecnología ha sido clave: microexcavación en laboratorio, registro documental, registro integral y dictaminación de bienes inmuebles.

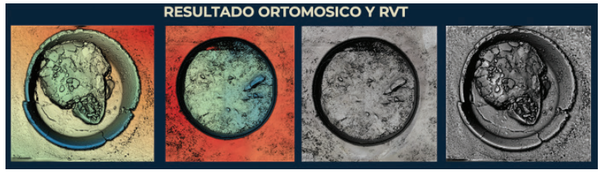


Figura 8. Ortomosaicos y aplicación de filtros RVT (Relief Visualization Tools) obtenidos del registro fotogramétrico de dos piezas con proceso de microexcavación. Fuente: Área de conservación, Proyecto Salvamento Arqueológico del Tren Maya. Año de toma: 2025. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/X0iYKsfRGZw?si=QHJfzN_y_wK70vRf&t=4585*

La microexcavación se entiende como el proceso de excavación de contextos arqueológicos realizado en laboratorio. En este procedimiento los contenedores, que pueden ser vasijas, ollas u otros recipientes que contienen tierra con material de contexto, son intervenidos en condiciones controladas con el objetivo de identificar los distintos estratos presentes en su interior.

De ahí surgió la oportunidad de integrar la microexcavación con toda la información recolectada durante el trabajo de campo, gracias al registro metodológico y documental. Esta información, generada por arqueólogos, topógrafos y otros especialistas que conforman un equipo multidisciplinario, permite geolocalizar los contenidos de estos recipientes, conservando así el contexto arqueológico de su procedencia. A este proceso se añadió el uso de técnicas digitales ya empleadas en otras áreas del proyecto, como la fotogrametría y los sistemas de información geográfica (SIG), los cuales enriquecieron significativamente el análisis por la información aportada.

Como resultado, se obtuvo una cantidad considerable de datos valiosos de cada entorno, entre los que se incluye la ubicación, así como la orientación precisa de las piezas mediante geolocalización vinculada con el contexto registrado en campo, además de los modelos digitales de relieve y los niveles métricos reales del área de procedencia del objeto contenido en la pieza.

Los resultados derivados de este proceso son, a su vez, insumos para análisis adicionales, como la aplicación de filtros de relieve sobre ortomosaicos y la generación de modelos digitales de elevación, con el fin de comprender mejor la superficie donde fueron recuperados los objetos. Asimismo, se dibujaron plantas y se etiquetaron los objetos usando los ortomosaicos, permitiendo su identificación precisa y sistemática, facilitando el proceso de restauración posterior.

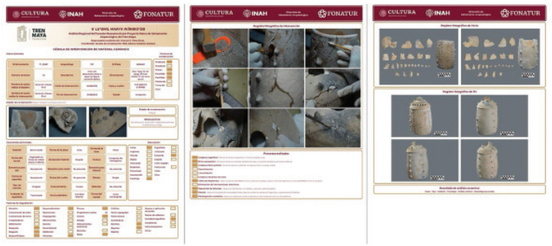


Figura 9. Cédula de intervención automatizada de una pieza proveniente del tramo 7, intervenida dentro del laboratorio de conservación. Fuente: Área de conservación, Proyecto Salvamento Arqueológico del Tren Maya. Año de toma: 2024. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/X0iYKsfRGZw?si=QJCdG_n8ceagktuA&t=4715*

Respecto al registro documental, el uso de tecnologías cumple un papel fundamental en el área de conservación, ya que facilita la elaboración de cédulas de registro de conservación, intervención y catálogo. Esto se logra mediante la creación y uso de una base de datos que concentra toda la información relacionada con las piezas recibidas en los laboratorios de restauración, no sólo en cuanto a sus características físicas, sino también en la incorporación de los datos contextuales como la capa estratigráfica, el cuadro de excavación, así como las intervenciones realizadas.

Con esta base de datos se configuró la automatización de las cédulas, reduciendo significativamente los tiempos de procesamiento en su elaboración. Por lo tanto, la optimización del tiempo fue uno de los principales beneficios obtenidos con este proceso. Para llevar a cabo la automatización se empleó el programa de acceso libre QGIS, mediante el cual se trabajó directamente con la base de datos, donde se logró automatizar y homologar la información, teniendo como resultado una optimización importante de tiempo. Esta misma base fue utilizada para la creación y generación de cédulas específicas solicitadas por el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), como es el caso de la Cédula de Catálogo de Salvamento (CATSA) y las inscripciones con folio real en el Registro Público de Zonas y Monumentos Arqueológicos e Históricos del Instituto Nacional de Antropología e Historia.

El uso de esta metodología muestra sus ventajas ante la complejidad del flujo de trabajo en el área, determinada por la gran cantidad de piezas intervenidas, en proceso y pendientes de intervención. Hasta la fecha, se han trabajado mil 585 piezas a lo largo

de casi cuatro años, y aún restan por restaurar mil 284. Por lo tanto, la implementación tecnológica contribuye directamente a la efectividad en la cadena de operación.

Otra ventaja relevante del uso de bases de datos es la posibilidad de generar tablas y tableros dinámicos (*dashboards*) para visualizar los avances del trabajo dentro del área de conservación. Estos recursos permiten mostrar la ubicación actual de las piezas, el tipo de material trabajado, así como su procedencia *in situ*. Además, permite generar mapas interactivos facilitando la difusión de los avances. Esta información, al tener una estructura calificable, es ideal para realizar consultas técnicas y de seguimiento.



Figura 10. Mapa de origen de ubicación de las piezas restauradas obtenido a partir del tablero dinámico. Fuente: Laboratorio de análisis geoespacial, Proyecto Salvamento Arqueológico del Tren Maya. Año de toma: 2024. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/X0iYKsfRGZw?si=t5_CGacMGXNDgl6g&t=4846*

Otra parte igualmente importante es el uso de tecnología en el registro integral de los bienes culturales dentro del área de conservación. Una de las labores fundamentales del restaurador es el registro de los procesos llevados a cabo, desde el inicio hasta el final de la intervención. Por lo tanto, se complementó el registro fotográfico del proceso con un registro fotogramétrico, con el objetivo de obtener mayor cantidad y calidad de información sobre las piezas.

Asimismo, se desarrolló una metodología de registro, la cual fue aplicada a cada pieza intervenida, generando un registro fotogramétrico mediante el uso de cámaras de sensor completo y ópticas de distancias focales, seleccionadas según la naturaleza de cada objeto. La variedad de materiales intervenidos, como cerámica, hueso, concha, piedra o estuco, requirió adaptar esta metodología para obtener modelos tridimensionales de alta fidelidad.

Para la creación de dichos modelos 3D, se utilizó el programa Metashape, mediante el cual se procesaron las imágenes registradas en laboratorio. El proceso incluyó la generación de una nube de puntos, la construcción de una malla y, posteriormente, el texturizado. Una vez finalizados los modelos, se crearon los Modelos Digitales de Elevación (DEM) y ortomosaicos, los cuales fueron tratados mediante filtros de relieve (Relief Visualization Tools, RVT), lo que permitió obtener información adicional de las piezas.



Figura 11. Modelo 3D de una urna antropomorfa procedente del tramo 7 y el Modelo digital de elevaciones, obtenido a partir del modelo fotogramétrico. Fuente: Área de conservación, Proyecto Salvamento Arqueológico del Tren Maya. Año de toma: 2025. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/X0iYKsfRGZw?si=pQGEYmDJ61Ai35jl&t=5141*

Estos modelos tridimensionales se han convertido en herramientas clave tanto para la difusión como para el análisis detallado de las piezas, ya que aportan información precisa sobre las características físicas, texturas, inscripciones y huellas de herramientas o uso. Como ejemplo, se pueden mencionar diversos elementos recuperados a lo largo de los diferentes tramos donde se desarrolla el proyecto, que gracias al registro fotogramétrico han sido estudiados con mayor detalle. Un caso particular es el de un elemento óseo con talla hallado en Sacamucuy, el cual fue procesado a través de un proceso de *roll-out* dentro del *software* Metashape, para extender su superficie en una imagen plana e integral, permitiendo al epigrafista interpretar la inscripción localizada sobre el elemento.



Figura 12. Fotografía de inicio de intervención del elemento óseo con talla perteneciente a Sacamucuy y *roll-out* generado a partir del modelo 3D. Fuente: Área de conservación, Proyecto Salvamento Arqueológico del Tren Maya. Año de toma: 2025. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/X0iYKsfRGZw?si=YiequMHW_YG68BTH&t=5194* / INAH TV: *https://www.youtube.com/live/X0iYKsfRGZw?si=EX5bk2x-dJInL9yi&t=5217*

Finalmente, el uso de tecnologías también ha sido fundamental en el registro y dictaminación de bienes inmuebles. A través de levantamientos fotogramétricos realizados con drones, se llevó a cabo el registro integral de inmuebles históricos ubicados dentro del derecho de vía. Este proceso permitió generar modelos tridimensionales de los edificios patrimoniales, con los que fue posible construir ortomosaicos y, a partir de ellos, plantas, cortes y alzados arquitectónicos. Posteriormente, se elaboraron dictámenes del estado de conservación de cada inmueble, consolidando una base de datos que, al

igual que la de bienes muebles, fue automatizada para generar cédulas de conservación. Éstas incluyeron datos recabados *in situ*, registros fotográficos y toda la información relevante de los bienes.

Comentarios finales

En conclusión, puede afirmarse que el salvamento arqueológico es, ante todo, una labor de investigación que responde a las necesidades de las poblaciones modernas y que protege el patrimonio mediante actividades de registro, recuperación, conservación, restauración, investigación y difusión del patrimonio arqueológico, tanto mueble como inmueble. Por lo tanto, la incorporación y uso de nuevas tecnologías, así como la colaboración interdisciplinaria, son fundamentales, ya que permiten realizar estas tareas con mayor precisión y en menor tiempo.

La aplicación de tecnologías digitales de registro documental y gráficas ha contribuido de manera importante a la recuperación de información tanto detallada como fidedigna, así como a la optimización del trabajo en campo y en las distintas áreas del proyecto. Asimismo, se está consolidando una nueva forma de conservar digital y virtualmente el patrimonio recuperado, lo cual permite su consulta y estudio por diferentes grupos de investigadores. Los productos generados a partir de estas herramientas tecnológicas no sólo facilitan el acceso a la información, sino que también abren la posibilidad de crear plataformas digitales que acerquen los resultados de la investigación al público en general de manera accesible, clara y económica. Por consiguiente, se abren posibilidades a nuevas formas de estudiar y socializar el patrimonio cultural intervenido en las grandes obras de infraestructura.

Fuentes de información

Carrillo Garza, V. (2019). *La digitalización tridimensional del patrimonio cultural mueble como herramienta para la conservación: fotogrametría digital y escáner de luz estructurada*. Tesis de Licenciatura. Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía. INAH, Ciudad de México.

Felicísimo, Á. M., Durán-Domínguez, G., Tortosa, T., Morán, C. J., De los Reyes de Soto, M., Polo, M. E., & Rodero, A. (2020). Representación tridimensional de objetos arqueológicos: una propuesta de arqueología virtual. *Her&Mus*, 21, 185-205. *https://digital.csic.es/bitstream/10261/230212/1/repretri.pdf*

Gómez-Heras, M., & Fort, R. (2012). *Patrimonio cultural y nuevas tecnologías: diagnóstico, conservación y difusión*. Madrid: CSIC. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Medina González, E. I., & Pereira, G. (2018). Una aproximación a la digitalización tridimensional de entidades prehispánicas en cuatro escalas: artefacto, monumento, arquitectura y sitio. En Ramírez Méndez, J., Valero Pié, V. y Mora Flores, A. (Eds.), *Tecnología 3D por barrido láser aplicada al estudio, protección, conservación, restauración y difusión del patrimonio cultural de México*. Publicaciones ENCRyM.

Quintilla Castán, M., & Agustín Hernández, L. (2022). Metodología de captura y procesado para el desarrollo de una base de datos gráfica 3D del patrimonio arquitectónico. *Ge-Conservación*, 21(1), 72–84.

Rodríguez Temiño, I. (2018). Modelos tridimensionales del patrimonio: entre la documentación científica y la difusión cultural. *Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 26(94), 80-89.

Mesa 5
La cooperación México y Francia para la conservación del patrimonio cultural







Moderador: **Mtro. Juan Antonio Rodríguez Hernández**
Presidente de la Asociación Alumni México Francia

Secretaria: **Mtra. Joselyne Ramírez Hernández**
Vocal de la Asociación Alumni México Francia

Para mayor detalle escanea el código QR y podrás ver la transmisión completa de esta sección del Encuentro México y Francia

Crédito: CICM-imagen en evento. Esta página







REMPART, una red al servicio del patrimonio y de las personas
Lic. Marie-Georges Pagel Brousse
Presidenta de la Unión REMPART
Mtra. Johanna O'Byrne
Red Internacional de la Unión REMPART



Los modelos digitales al servicio del patrimonio de la humanidad, el caso de Notre Dame de París
Arq. José Alejandro Arredondo Guillén
Especializado en modelos digitales en Art Graphique et Patrimoine



SCORE, un proyecto de colaboración entre Europa y México sobre el patrimonio arquitectural
Dra. Beatriz Menéndez Villar
Catedrática en la Universidad Cergy París

Nota: Imágenes con enlace Web fueron transmitidas por INAH TV durante el evento realizado en el Auditorio Jaime Torres Bodet (Museo Nacional de Antropología).

Crédito: CICM-imagen en evento. Esta página
Excepto retratos oficiales de ponentes.

La mesa 5 tiene como propósito analizar la cooperación entre México y Francia para la conservación del patrimonio cultural. Para ello, conviene recordar al gran escritor mexicano Carlos Fuentes, quien señalaba que "el pasado se llama memoria; el futuro, deseo". Es así como nos encontramos ambos países: México y Francia, en un diálogo fructífero y constante en donde el pasado se mira desde el presente, con el ánimo de seguir construyendo hacia el futuro. Esto que hemos evocado en sueños de nuestro pasado lo proyectamos en ideas, en deseos, para un futuro común como humanidad.

Por consiguiente, a través de estas miradas cruzadas, la mesa tiene como propósito abordar los mecanismos de cooperación y de colaboración entre ambos países en esta materia, lo cual permitirá entender cómo México y Francia pueden trabajar de manera conjunta en la conservación del patrimonio cultural.

En primera instancia, Marie-Georges Pagel-Brousse y Johanna O´Byrne, presidenta y delegada nacional encargada de asuntos internacionales de Unión REMPART, respectivamente, abordan los diversos mecanismos de cooperación con que cuenta dicha organización, señalando un ejemplo excepcional de colaboración entre México y Francia a través del Proyecto SCORE, en el cual el estado de Campeche se encuentra con Perillos y Coucy-le-Château en Francia.

Por otro lado, Alejandro Arredondo Guillén, arquitecto mexicano especializado en modelos digitales en la empresa Art Graphique et Patrimoine –agencia de ingeniería especializada en monumentos históricos–, desarrolla sobre su experiencia de índole trascendental, al haber sido el responsable de elaborar las proyecciones 3D que sirvieron de base para la reconstrucción de la Catedral de Notre Dame de París. Alejandro Arredondo coordinó un equipo que mediante el uso de escáneres tridimensionales y drones de alta precisión capturó información de toda la catedral, incluyendo aquellos ángulos que resultaban prácticamente inaccesibles, lo que permitió levantar planos modelo y crear una maqueta tridimensional realizada a partir de la base de datos obtenidos.

Finalmente, se cuenta con la participación de Beatriz Menéndez Villar, doctora en geología por la Universidad de Oviedo, profesora en la Universidad Cergy París e investigadora en el Instituto de Ciencias de la Tierra de París, cuyas investigaciones se centran en el almacenamiento de residuos radiactivos y CO_2 en el subsuelo, así como en la degradación y conservación del patrimonio arquitectónico mediante estudios de petrofísica y mecánica. La doctora Menéndez expone cómo nació el Proyecto SCORE (Sustainable COnservation and REstoration of Built Cultural Heritage), en qué consiste y presenta algunos de los resultados obtenidos para la conservación de edificios, atendiendo a las características particulares de cada patrimonio.

Moderador: **Mtro. Juan Antonio Rodríguez Hernández**

REMPART, una red al servicio del patrimonio y de las personas

Lic. Marie-Georges Pagel Brousse
Mtra. Johanna O'Byrne

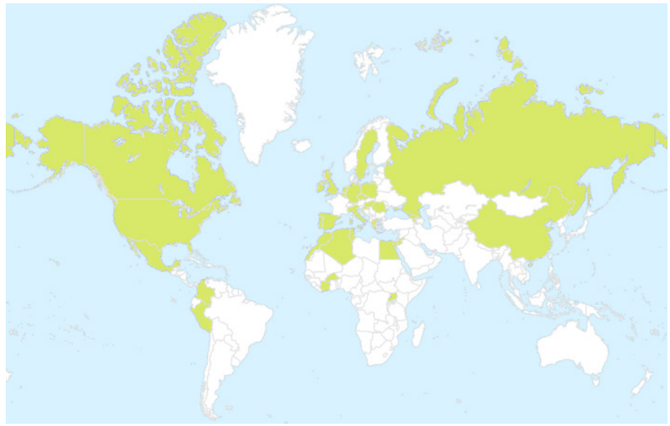


Figura 1. El mapa internacional muestra en verde los países en los que REMPART ha desarrollado colaboraciones con organizaciones de la sociedad civil para proyectos de protección del patrimonio; el mapa de Francia muestra nuestra red dentro de Francia. Crédito: REMPART.

¿Qué es REMPART? REMPART es una organización nacional que cumplirá 60 años en 2026, que tiene la ambición de unir a los ciudadanos en torno a un proyecto concreto y colectivo, sobre el patrimonio. Estamos organizados en red y nuestra red cuenta actualmente con 200 asociaciones por toda Francia, que representan a más de 10 mil ciudadanos activos y comprometidos. Nuestra actividad principal es la organización de obras de voluntarios para la restauración del patrimonio; con esa misión damos la bienvenida a cerca de 4 mil 500 participantes de todas las edades, cada año. Estimamos que desde hace 59 años hemos restaurado, aproximadamente, mil sitios históricos en Francia, sin contar los del extranjero. Pero, como veremos, el patrimonio trasciende evidentemente las fronteras de Francia y tenemos también más de 50 socios en unos 30 países.

Todos los sitios que restauramos responden a una obligación que es fundamental para nosotros y que obliga a los miembros de nuestra red, es la de su reutilización.

Así, recibimos a unos 150 mil visitantes cada año en todos los eventos que se organizan en estos sitios y, por supuesto, de los escolares en actividades pedagógicas.



Figura 2. Red de REMPART en Francia. Crédito: REMPART.

La filosofía que une a los miembros de REMPART es muy fuerte y se basa en una carta particularmente edificante e inspiradora, que estipula, por ejemplo, que debemos trabajar tanto para el beneficio del patrimonio construido y natural, como para la satisfacción de las personas sensibles a estos proyectos. Esto es importante porque el patrimonio y los seres humanos no son indiferentes uno del otro, están juntos.

Cada elemento del patrimonio está en el corazón del proyecto de la asociación local; es, a la vez, su objetivo y su soporte. El objetivo, porque se trata de restaurar, rehabilitar, reutilizar, pero también de transmitir este legado a las generaciones futuras, este patrimonio que hemos heredado. Y es también un soporte, a la vez de formación, de descubrimiento, de aprendizaje, de inclusión social, de socialización de las personas, jóvenes o no, que participan en estos proyectos.

REMPART considera que el patrimonio es un vínculo entre los hombres, entre los seres humanos, entre las personas, para construir un futuro sostenible. Ésta es una de nuestras ambiciones, y queremos que cada uno encuentre su lugar y sea acogido con los brazos abiertos.



Imagen 1. Andamios: El primer proyecto REMPART en México: voluntarios trabajan en la restauración de Xochimilco, destruido por el terremoto de 2017. Crédito: REMPART. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Nuestra ambición es que el patrimonio sea un bien común que se utilice colectivamente, y que los voluntarios, los miembros de las asociaciones, pero también todas las partes interesadas en torno al proyecto, puedan apropiarse de él. Porque para REMPART, el patrimonio no es sólo un asunto de expertos, de propiedad privada o de colectividades locales, es un tema de todos.

La cobertura nacional de las asociaciones de REMPART va más allá del territorio francés, como la que tenemos en los departamentos de ultramar, como la isla de Martinica en el Caribe donde ya hay asociaciones REMPART, y pronto intervendremos en las islas Mayotte y La Reunión, en África, tras el paso del ciclón *Chido* en diciembre de 2024.

REMPART es también una red que ha crecido internacionalmente desde sus primeros años. La red nace en 1966, y desde finales de los años sesenta llegaban jóvenes desde el extranjero, a participar en talleres de voluntarios sobre el patrimonio.

Los talleres de voluntarios nacen históricamente en un enfoque pacifista. En 1920, jóvenes de Luxemburgo, de Suiza, de Francia, de Gran Bretaña y también de Alemania, es decir los antiguos beligerantes de la Primera Guerra Mundial que había devastado el norte de Francia una década antes, decidieron reagruparse para reconstruir juntos el pueblo de Esnes, cerca de Verdún. REMPART se inscribe plenamente en esta iniciativa internacional de solidaridad, favorable al diálogo entre las culturas, que permite un encuentro, un diálogo, que pone fin a los prejuicios y establece vínculos fuertes entre los pueblos en paz. Es genial cuando la cultura lo permite. Nuestros astilleros lo reivindican especialmente.

Desde los años sesenta, REMPART ha creado una red que se ha ido desarrollando poco a poco. Hoy contamos con una cincuentena de socios que provienen todos de la sociedad civil, con más o menos actividades y diferentes tipos de intercambios. Algunas es-

tructuras tienen como proyecto la movilidad de jóvenes, o no tan jóvenes, voluntarios en obras en Francia. Otros tienen ganas de crear su propio proyecto; REMPART intenta acompañarlos en esta dirección, sobre la base de su historia. Eso es lo que pasó con México.

La historia comienza en 2017, después del terrible terremoto que afectó a México. El Ministerio de Relaciones Exteriores francés decide entonces relanzar los vínculos entre Francia y México apoyándose en acciones culturales. Más exactamente, la reconstrucción del patrimonio destruido por el terremoto. El REMPART entonces fue solicitado por las recomendaciones del Ministerio de Cultura, que conoce y apoya lo que hacemos desde hace años, para participar en el proyecto de restauración del patrimonio en un sitio muy simbólico: Xochimilco. Allí, voluntarios REMPART franceses y mexicanos participaron en esta restauración en un taller intercultural. También nos reunimos con nuestro primer socio mexicano, la Asociación Mexicana de Voluntariado Internacional, AC (AMVIAC), con la que seguimos trabajando. Desde entonces, cada año se realizan talleres de voluntarios en territorio mexicano, con el apoyo del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) de Puebla, a quien agradecemos por su confianza.

Doscientas asociaciones en el territorio francés, una cincuentena de socios a nivel internacional, son patrimonios muy variados. Se pasa del castillo medieval a los fuertes defensivos sobre zonas fronterizas, la mayoría en zonas rurales, y en estados muy diversos. Proponemos, pues, muchos proyectos de construcción en torno a la piedra, pero como REMPART reúne también asociaciones que defienden el patrimonio industrial, ferroviario, y marítimo, la variedad de propuestas de proyectos de restauración es enorme.

Estos proyectos REMPART se inscriben en el tiempo largo, el del patrimonio y su transmisión, el del voluntariado.

Concretamente, un astillero es un grupo de personas, entre ocho y 15 voluntarios, que participan juntos en un proyecto de interés general de restauración del patrimonio, durante una a dos semanas, en una organización encuadrada. Dos supervisores acompañan a los voluntarios en la gestión de la obra. Un supervisor se ocupa de la vida comunitaria. Estas personas no se conocen entre sí, todos aman el patrimonio, quieren dar su energía, su tiempo, pero llegan sin conocerse y comparten esta experiencia viviendo juntos. Este proyecto les ayudará a organizarse y a vivir juntos, a estar en la relación social e intercultural, el descubrimiento de los demás, pero también a respetarse unos a otros, a descubrirse y participar en la vida colectiva del sitio. Al mismo tiempo, un supervisor técnico, especialista en la restauración requerida para el sitio, va a transmitir su *know-how* ("saber hacer"). En este caso, muchos de los formadores provienen del campo de la albañilería tradicional y de la talla de piedra.

En Francia, el 80 por ciento de los sitios REMPART están enumerados o clasificados, es decir, protegidos por el código del patrimonio, el cual fue creado en 1913 y actualizado desde entonces, impone obligaciones para toda intervención sobre el patrimonio y, en particular, su restauración. Nuestras asociaciones se ajustan plenamente a estas obligaciones. Así, para todo el desarrollo de su proyecto de construcción, la asociación va a trabajar en conjunto con los arquitectos de edificios de Francia, con el arquitecto en jefe de monumentos históricos (ACMH), responsable del monumento en cuestión. Estos

expertos van a seguir el proyecto desde su creación, validar no sólo la intervención de la restauración, sino también cada una de las etapas que representarán las sesiones de trabajo de los voluntarios que van se van a requerir. Es en el respeto de esta organización, que podemos tener intervenciones de voluntarios sobre el patrimonio en Francia desde 1966. Un respeto por el patrimonio que compartimos con nuestros socios internacionales.

Estos voluntarios llegan a la obra sin ningún conocimiento o competencia técnica. Es gracias a la calidad de la supervisión llevada a cabo por REMPART que los conocimientos se transmiten a los voluntarios y se practican durante la sesión de trabajo. Es también gracias al diálogo vigilante de las asociaciones con los arquitectos de los edificios de Francia (ABF) y los ACMH, quienes se encargan de validar el trabajo al final de la obra, que existe una confianza entre REMPART, el Ministerio de Cultura y las autoridades de protección del patrimonio, desde hace casi 60 años.

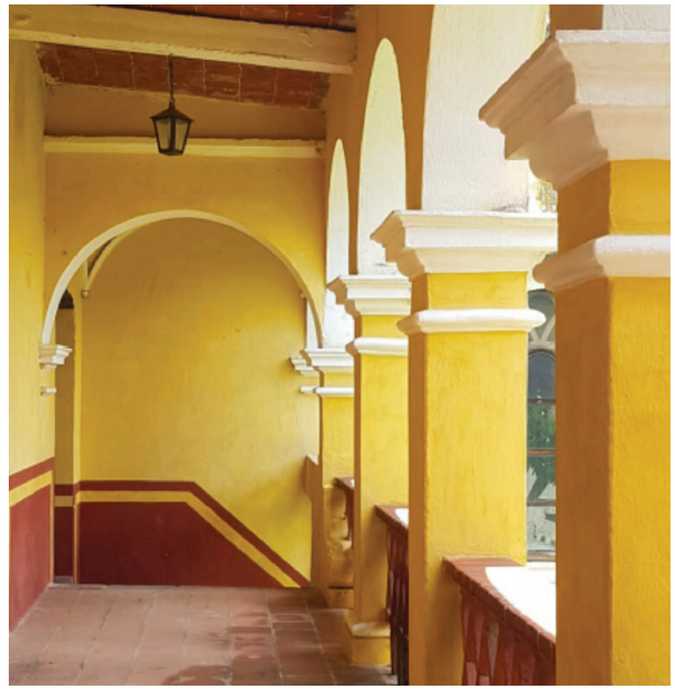


Imagen 2. Arco y perspectiva en ocre: el sitio del monasterio de Calpan (UNESCO). Proyecto REMPART en México desarrollado con nuestro socio AMVIAC. Crédito: REMPART. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=qlviWoUx4cj_hQXq&t=439*

Gracias a este acompañamiento de especialistas y expertos, los proyectos permiten una transmisión de los conocimientos técnicos de la restauración del patrimonio construido, del patrimonio inmaterial. En las obras no es necesario tener habilidades. Los supervisores están allí para transmitir los detalles hasta el momento en que sean completamente aprendidos por los voluntarios de la obra.

Es una gran oportunidad para los aficionados que de esta forma pueden adquirir habilidades en las técnicas tradicionales de la restauración y descubrir los oficios del

patrimonio. Una obra permite una toma de conciencia del patrimonio y su riqueza y, posiblemente, suscitar vocaciones a través de estos descubrimientos. REMPART ha puesto en marcha una serie de dispositivos para que, a través de un curso de profesionalización, de acción de precalificación, el patrimonio se convierta en un formidable soporte, una excelente herramienta pedagógica de descubrimiento del saber. Al permitir a todo el mundo participar en estos proyectos, REMPART se dirige también a las personas con dificultades sociales para ofrecerles en cualquier caso, quizás un futuro, la oportunidad de encontrar una esperanza, soluciones, y poder pensar en oportunidades para recuperar un lugar digno en la sociedad.

Estos proyectos se inscriben en el tiempo largo, pero en el fondo, si el objetivo es reconstruirlo, no estamos seguros. El objetivo es estar aquí y ahora, juntos. Hacer de este sitio, un bien común para nuestras comunidades, en el que vamos a participar, del cual vamos a sacar provecho compartiendo y asistiendo a eventos culturales, exposiciones, festivales, etc. Tal vez es el momento lo que importa, el momento que hará que los seres humanos se reúnan a través del patrimonio. Lo que queremos es que, tanto en los talleres de voluntarios como durante las manifestaciones que se desarrollen en el sitio patrimonial restaurado, una aventura humana tome vida gracias al patrimonio.

Estos sitios patrimoniales son, al mismo tiempo, ocasiones de apropiación del patrimonio y de sus técnicas en el momento de las obras, y lugares que, gracias al nuevo uso que les es dado por el proyecto de restauración, van a permitir a la gente proyectarse en la historia a través de la mediación o visitas escolares, o para compartir diversas actividades sociales o culturales.

Por supuesto, en la esfera del patrimonio, como en todas partes, vemos los efectos perniciosos y perjudiciales del cambio climático. Es por eso que trabajamos juntos en nuestros sitios, pero también en nuestras estructuras, para responder a los enormes desafíos que esto genera.

Hemos decidido comprometernos en particular con la transición ecológica y la biodiversidad, porque si el patrimonio ofrece vías de resiliencia, las actividades asociativas que se llevan a cabo para preservarlo, lo integran. Por último, ya existen prácticas que se inscriben en el marco, en el espíritu de la acción, por el clima. Por supuesto, salvaguardando las especies y los ecosistemas, pero también manteniendo la biodiversidad biológica y la cohesión social.

Para ello, hemos identificado todas las posibilidades de ser un actor eficaz, pero también un transmisor de conocimientos y herramientas. Hemos escrito un *Libro Blanco* donde se proponen soluciones y se dan ejemplos sobre lo que es posible hacer no sólo en obras de restauración, sino también dentro de nuestras propias estructuras. Este *Libro Blanco* fue traducido al español por nuestro socio mexicano Nicolás Aguilar.

De hecho, evidentemente, se trata de reutilizar, reciclar al máximo todos los materiales, la madera, pero también los escombros, que son tamizados para recuperar arena, a fin de que no se compre ni se transporte, ya que resulta muy caro y no sirve de nada. Las piedras se recuperan, así como los yesos, porque el yeso se recuece al infinito. Hay otro problema que es extremadamente importante en todas partes: el del agua, que es a la vez un recurso y un medio. Al respecto, tenemos el ejemplo en el pueblo de Périllos,

en los Pirineos orientales, donde no hay agua y se tuvo que crear un sistema de fitodepuración para recuperar el agua de lluvia cuando era posible, porque llueve muy poco. El agua captada se utilizó al menos tres veces, una primera para la vajilla, luego para limpiar las herramientas después de la obra, y finalmente para hacer el mortero, de tal manera que no se perdiera en absoluto.



Imagen 3. Arcos en la vegetación: el acueducto de Cuautla (Morelos). Proyecto REMPART en México desarrollado con nuestro socio AMVIAC. Crédito: REMPART. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=hRlYgOALcCq2CRT3&t=1690*

Y para concluir sobre este tema que compromete nuestro futuro, podemos hablar de SCORE y agradecer a la Universidad de Cergy por habernos integrado al Programa europeo Horizon. Este proyecto científico ha permitido a las asociaciones REMPART acoger especialistas en el clima. Sin duda, sobre la base de estas buenas prácticas compartidas dentro de la red REMPART y a través de nuestro *Libro Blanco* "actuar para la transición ecológica y la biodiversidad", nuestras asociaciones han sido particularmente sensibles al tema. Gracias al programa, los científicos salieron de su laboratorio para compartir las obras del pueblo abandonado de Périllos y del castillo monumental de Coucy-Château, y hacer todo un trabajo de recopilación y agregación de datos. Estos trabajos científicos tienen como objetivo validar modelos de evaluación de las vulnerabilidades de los sitios del patrimonio ante los cambios climáticos, para un día poder equiparlos.

De forma inversa, fuimos recibidos en la Universidad Autónoma de Campeche para descubrir en el laboratorio, los ensayos de impactos de estos cambios climáticos sobre los materiales del patrimonio.

El patrimonio no es un lujo, es una necesidad para nuestras raíces, nuestra identidad, nuestra cohesión social, nuestro bienestar; preservarlo nos ofrece vías de resiliencia inesperadas y sorprendentemente humanistas. Es nuestra responsabilidad trabajar juntos en esta ambición, demostrar la alianza entre patrimonio y transición ecológica.

Debemos cultivar nuestra apertura al mundo e inspirarnos en nuestros socios internacionales.

El camino es largo aún, por ello hay que mantener una fe inextinguible en nuestra voluntad de construir un mundo mejor gracias al patrimonio.

Los modelos digitales al servicio del patrimonio de la humanidad, el caso de Notre Dame de París

Arq. José Alejandro Arredondo Guillén

En primer lugar, quiero agradecer a todos los organizadores de este encuentro. Presentaré la historia de cómo desarrollamos una maqueta BIM (Building Information Modeling) de la Catedral de Notre Dame de París, gracias al uso de herramientas como escáneres 3D y drones.

Empezaremos de una manera muy visual. Lo primero que estamos viendo es una imagen que busca explicar el proyecto de la Catedral de Notre Dame de París. Del lado izquierdo se aprecia la maqueta que desarrollé junto con mis compañeros de Art Graphique et Patrimoine (AGP), y del lado derecho vemos cómo empatan la nube de puntos y la maqueta digital en blanco y negro.

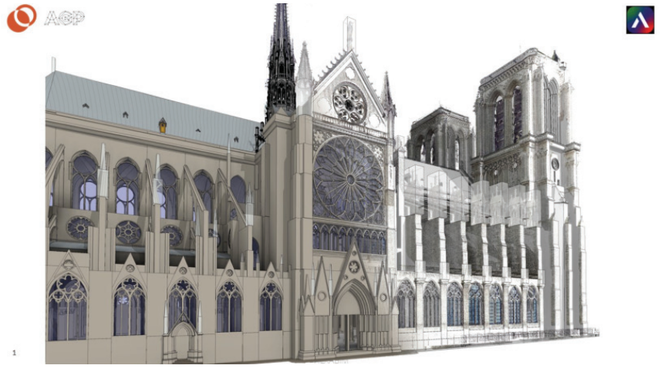


Figura 1. Proyecto de la Catedral de Notre Dame. Crédito: Art Graphique et Patrimoine.

Esto nos permitirá explicar paso a paso cómo lo hicimos, a fin de lograr que una maqueta digital sea fiel a la realidad. Quisiera comenzar con el aspecto histórico. Como ustedes saben, Notre Dame es una catedral ubicada en la isla de la ciudad, el centro o corazón de París. Su construcción data del año 1163, es de estilo gótico y durante más de 850 años ha sido renovada y embellecida de diferentes maneras. Al principio, como una iglesia romana, y poco a poco fue evolucionando hasta lo que conocemos hoy en día, como una catedral de estilo gótico.



Figura 2. Un poco de historia de Notre Dame. Crédito: Art Graphique et Patrimoine.

Del lado derecho de la siguiente figura vemos la nave central, enseguida el transepto y al fondo el coro y el deambulatorio. Al respecto, hubo varias renovaciones, siendo una de las más destacadas la que hizo el arquitecto Viollet-le-Duc en el siglo XIX, quien restauró el edificio que, en ese entonces, ya estaba dañado por la Revolución francesa. Asimismo, añadió estatuas y levantó la aguja generando la imagen de Notre Dame que conocemos. La catedral destaca a nivel mundial pues recibía –antes del incendio– un promedio de 13 a 14 millones de turistas al año, siendo así el monumento más visitado de toda Europa.



Figura 3. Elementos históricos e historia de la Catedral de Notre Dame. Crédito: Art Graphique et Patrimoine.

Sin embargo, en el siglo XXI, el 15 de abril de 2019, aconteció el trágico incendio que tuvo graves consecuencias en la edificación. Debido a este evento, el fuego en la estructura de madera provocó el derrumbe de la aguja, que al caer dañó las bóvedas y la parte estructural de la catedral. Además, el intenso calor fundió el plomo de la cubierta creando una nube tóxica para la salud.



Figura 4. El 15 de abril de 2019, día trágico para la Catedral de Notre Dame. Crédito: Art Graphique et Patrimoine.

A esto habría que añadir el agua utilizada para sofocar las llamas. Es decir, la estructura sufrió un calor intenso seguido de mucha agua, lo cual fue determinante para los trabajos que tuvimos que hacer después, ya que había que analizarlo a fin de identificar si existían algunas patologías del edificio.

En este punto, me gustaría hablarles un poco sobre Art Graphique et Patrimoine (AGP), empresa especializada en monumentos históricos desde hace más de 30 años y nuestro proyecto data de 2010 con una colaboración que se hizo con el historiador Andrew Tallon, con quien se realizó una primera campaña de levantamiento de la estructura de Notre Dame. En ese entonces se hizo el levantamiento de ciertas partes en el interior y exterior de la catedral.

Cabe mencionar que no fue una cobertura total, pero era un principio que se continuó en 2016 gracias a otras intervenciones complementarias, sobre todo en la parte de los campanarios y la cubierta. Por ello, podemos afirmar que ése era nuestro contexto previo como empresa.



Figura 5. Art Graphique et Patrimoine y sus estudios de la Catedral de Notre Dame. Crédito: Art Graphique et Patrimoine.

Al día siguiente del incendio, el director nos convocó para decirnos que el Establecimiento Público Encargado de la Restauración de Notre Dame de París (EP-RNDP, por sus siglas en francés) nos había seleccionado para colaborar y ayudar en la restauración.

A continuación, les muestro unas fotos en la figura siguiente:



Figura 6. Levantamiento 3D e imágenes de la Catedral de Notre Dame después del incendio. Crédito: Art Graphique et Patrimoine.

Lo que aquí se muestra fue un aspecto clave, pues pocos días después del incendio ya teníamos un equipo de campo con ingenieros listos con el material adecuado, atendiendo todos los protocolos de seguridad que había que respetar. Fue entonces que se inició la cobertura total del edificio.

Fue una ocasión excepcional ya que éramos la única empresa que podía decir cómo estaba la catedral antes del incendio; y también éramos los únicos que podíamos comparar con alta precisión un antes y un después, gracias a la tecnología con la que contamos actualmente: los escáneres 3D y los drones.

Fue una misión de urgencia, por lo cual había que reaccionar de manera inmediata y, al mismo tiempo, garantizar la seguridad en los equipos respetando los perímetros establecidos y analizando los riesgos, considerando si algún espacio era accesible o no, todo lo cual implicaba muchos retos para el equipo de campo.

Asimismo, había que gestionar aspectos de índole distinta a lo estructural, porque había un cierto choque emocional al conocer la historia y trascendencia del edificio. Sabíamos que la captación de datos tenía que ser rápida y eficaz. De hecho, durante la primera semana después del incendio, el equipo realizó más de 300 escaneos y más de 4 mil imágenes tomadas con drones en una primera campaña de levantamiento. Lo anterior, debido a que no todos los espacios eran accesibles, y progresivamente se continuó con esta labor durante el resto de 2019 y durante 2020. Al final pudimos conseguir una base de datos completa, total, que abarca más de 7 mil escaneos a color y más de 43 mil imágenes, lo que equivale a más de dos terabytes de datos procesados.

Esto se dice fácil, pero realmente es una enorme base de datos, porque se requieren computadoras con gran capacidad para trabajar este tipo y cantidad de información. Asimismo, se necesitan perfiles profesionales de diversas disciplinas. Al respecto, en Art

Graphique et Patrimoine contamos con ingenieros topógrafos e historiadores, pero también con canteros y arquitectos. Esta integración interdisciplinaria es la que nos permitió ofrecer una propuesta útil y completa.

De hecho, una vez que se tuvo toda esta parte de campo, lo que se hizo fue procesarla en nuestros *softwares* especializados, y el resultado es lo que se aprecia en la siguiente imagen.



Figura 7. Procesamiento de datos y ensamblaje y nube de puntos en la Catedral de Notre Dame. Crédito: Art Graphique et Patrimoine.

A primera vista vemos que se trata de Notre Dame, sin embargo, al hacer zoom sobre la imagen, nos percatamos que son sólo puntos pegados unos con otros y eso es lo que se conoce técnicamente como una "nube de puntos", en donde justamente vamos armando una especie de rompecabezas de todos los escaneos. De esta manera, se van ensamblando unos con otros con precisión milimétrica, ya que cada punto tiene una información de coordenadas en los ejes "x" "y" "z" y, al mismo tiempo, una información de color (RGB): rojo, verde, azul.

Ésta es una primera etapa para obtener un gemelo digital: un primer modelo que, hasta cierto punto, está todavía en bruto porque aún son puntos, unos con otros. Ahí es donde entramos mi equipo y yo, en el modelado del edificio. Es decir, filtramos los puntos para integrar la información a través de una maqueta digital (BIM). Con esta nube de puntos vamos a identificar a qué corresponden los puntos: a los muros, a los pilares, a la cubierta, a las vigas, etc., y de esta forma vamos a definir, poco a poco, la estructura mediante objetos geométricos, generando una maqueta de alta precisión con la información importante para la obra.

Lo anterior permite analizar el lugar como si estuviéramos ahí, constituyendo una de las ventajas de usar las tecnologías de hoy, porque basta con tomar la medida una vez y guardarla para utilizarla cada vez que se requiera, generando como resultado lo que vemos a continuación:

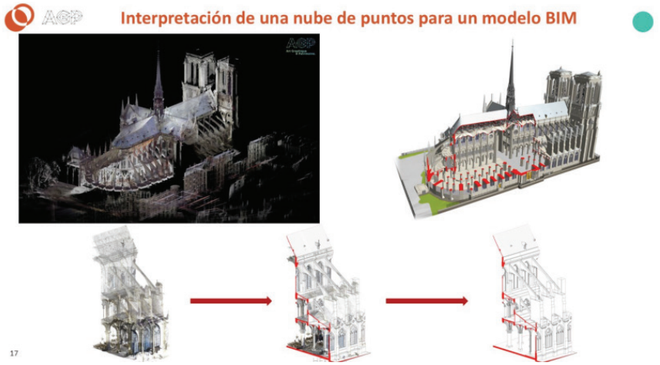


Figura 8. Interpretación de una nube de puntos para un modelo BIM de la Catedral de Notre Dame. Crédito: Art Graphique et Patrimoine.

Del lado izquierdo, con fondo negro, vemos la nube de puntos y del lado derecho, lo que constituye la maqueta.

Durante el proceso de modelado insertamos información dentro de parámetros específicos con características de las losas, pilares y bóvedas. En este sentido, es necesario señalar que en la Catedral de Notre Dame no existen dos elementos idénticos, es decir, cada arco tiene valores únicos; de hecho, los muros y los pilares también cuentan con valores únicos debido a sus inclinaciones. Nos enfrentamos a un reto muy particular. Aquí les muestro ejemplos muy claros:

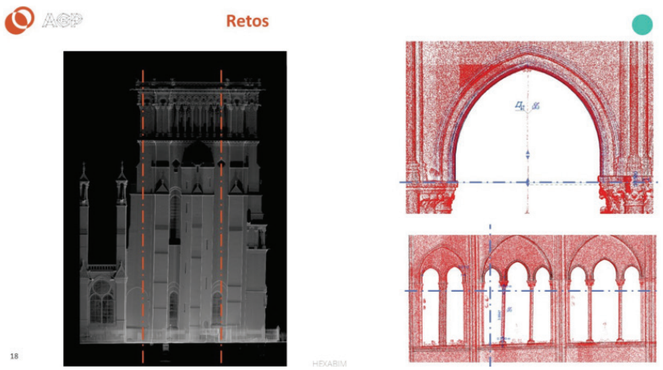


Figura 9. Retos de valores únicos debido a sus inclinaciones en la Catedral de Notre Dame. Crédito: Art Graphique et Patrimoine.

En la imagen del lado izquierdo vemos el masivo occidental, que es donde están las dos torres. Si trazamos una línea vertical, vemos cómo el masivo occidental está ligeramente inclinado. De hecho, cualquier persona podría decir que es mínimo el desfase, pero realmente estamos hablando de 40 centímetros o más entre un punto y otro. De este modo, confirmamos que para un monumento de la talla de Notre Dame es de suma importancia identificar dónde están los desfases y reducir los errores.

Del lado derecho vemos un arco, lo cual haría pensar que los arcos llegan a la misma altura que donde empiezan, pero no es así. Esto nos obligó a adaptarnos y a buscar soluciones específicas para este monumento, que ya contaba con deformaciones desde su construcción. Esto, hasta cierto punto, es "normal" en un edificio que ha vivido tanto y que fue construido en diferentes épocas.

Bajo esta perspectiva, era necesario identificar todos estos pormenores para llegar a uno de los mayores retos: modelar lo imperfecto, lo que durante varios siglos los obreros y artesanos construyeron con métodos tradicionales; algo que no enseñan en ninguna escuela, ya que los programas digitales de nuestra época están enfocados más a obra nueva y no están adaptados a los monumentos históricos. La dificultad radicaba, precisamente, en encontrar la manera de unir dos mundos, insertar datos geométricos "irregulares" en un instrumento que no está adaptado para trabajar con ellos. Al conseguir "crear un puente entre lo tradicional y las nuevas tecnologías" obtuvimos los resultados que aquí se pueden apreciar:

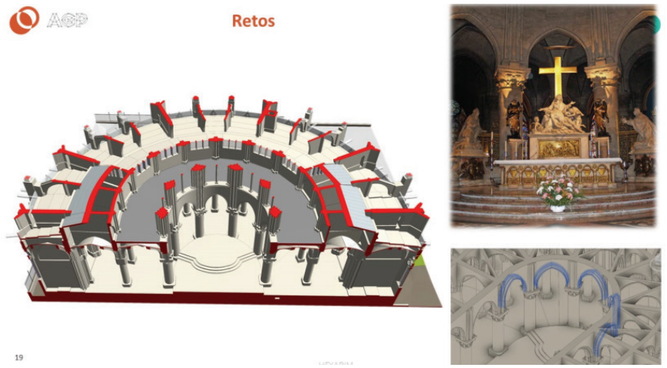


Figura 10. Retos de la representación de monumentos históricos mediante programas digitales de nuestra época en la Catedral de Notre Dame. Crédito: Art Graphique et Patrimoine.

Abajo a la derecha podemos ver los arcos que, si se observan en planta, es decir, desde arriba, son arcos que van girando con una curva. Esto, incluso utilizando las aplicaciones actuales, resulta complicado; pero cuando el equipo analizó todas las posibilidades y logramos ejecutarlas, fue un momento de orgullo. De hecho, con la carpintería que se conoce como "el bosque", sucedió lo mismo.

En la siguiente figura se aprecian las bóvedas, cuyas formas parten de una base geométrica pero entre ellas son bastante irregulares. Cuando terminábamos una, nos dábamos cuenta que la siguiente era totalmente diferente a la anterior. Y Notre Dame cuenta con más de 180 bóvedas, por lo cual modelizarlas no fue fácil.

Por estas razones reafirmo que ésta es la única maqueta que tiene tal nivel de precisión. Hablamos de que todos los elementos están entre uno a cuatro centímetros con respecto a la nube de puntos. En términos técnicos de detalle, se trata de un nivel (LOD) 350, que es bastante elevado. Y hay datos que podemos obtener a partir de la maqueta que nos pueden servir para la gestión de la obra, como superficies, altura bajo plafón, entre otros.

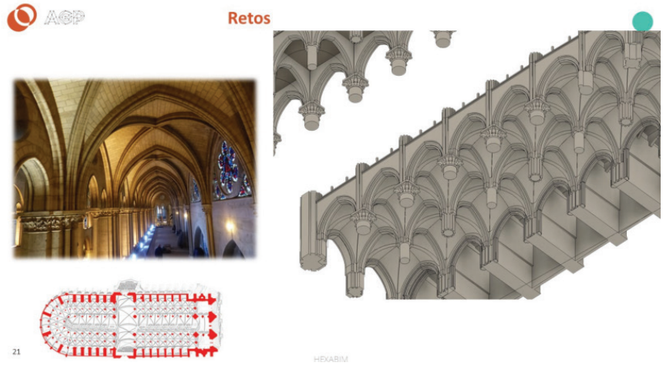


Figura 11. Retos de modelado de monumentos históricos mediante programas digitales de nuestra época en la Catedral de Notre Dame. Crédito: Art Graphique et Patrimoine.

Una de las ventajas de crear una maqueta BIM es que podemos seguir agregando información y explotarla de diferentes maneras. A continuación, presento algunos de los diferentes usos que puede tener la nube de puntos. En determinados casos podemos extraer cortes específicos, equivalentes a las "radiografías" en el campo de la salud. A esto, técnicamente se le denomina orto-imágenes (imagen de arriba) que permiten a ingenieros y arquitectos hacer los planos (imagen de en medio) y, por supuesto, la maqueta BIM (imagen inferior).

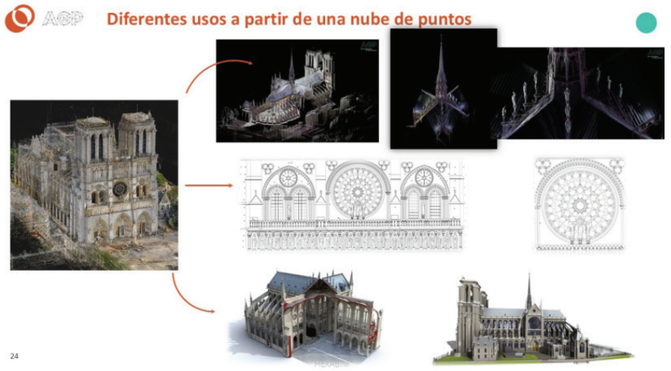


Figura 12. Diferentes usos a partir de una nube de puntos en la Catedral de Notre Dame. Crédito: Art Graphique et Patrimoine.

Por último, en la parte de abajo podemos observar una maqueta impresa en 3D, obtenida gracias a nuestro modelo BIM. Pero ¿qué se puede hacer con una maqueta impresa en 3D?

Se puede hacer un análisis de reacción ante vientos dominantes. En la siguiente figura, arriba a la derecha, se puede apreciar cómo reacciona la Catedral de Notre Dame ante los vientos.



Figura 13. Diferentes usos a partir de un modelo BIM en la Catedral de Notre Dame. Crédito: Art Graphique et Patrimoine.

En conclusión, un modelo BIM puede ofrecer diferentes usos para los equipos encargados de una obra arquitectónica. Una vez en posesión de un modelo fiel a la realidad es posible extraer información de valor, como los metros cuadrados de una superficie, metros cúbicos de materiales que se requieren, entre otros. No se trata de una maqueta que reemplace a todos los equipos, sino de una maqueta que pueda aportar a todos los equipos. Esto se traduce en optimizar tiempos, recursos y dinero. Por todo lo anterior, fue un logro que comparto con mi equipo y con ustedes.

Muchas gracias a todos por su atención.

SCORE, un proyecto de colaboración entre Europa y México sobre el patrimonio arquitectural

Dra. Beatriz Menéndez Villar

Este artículo tiene como objetivo explicar cómo nació el Proyecto SCORE (Sustainable COnservation and REstoration of built cultural heritage), en qué consiste y presentar algunos de los resultados obtenidos.

SCORE surge de la convocatoria europea MSCA RISE (Research and Innovation Staff Exchange) H2020 como parte de las Marie Sklodowska-Curie Actions (MSCA), programa de la Unión Europea que promueve la formación doctoral y de posdoctorado del personal de investigación académica y científica. ¿Cómo nace y cómo se concretiza este proyecto? El primer paso fue formar un equipo. Para eso nos basamos en las relaciones existentes con otros grupos de investigación, europeos y mexicanos, así como con una empresa en España. Con respecto a la temática, partimos de la idea general de crear un proyecto sobre el desarrollo sostenible en la conservación del patrimonio, tomando en cuenta el cambio climático. Un primer punto fue el desarrollo de materiales y métodos verdes e innovadores para la conservación de edificios. Para poder abarcar diferentes aspectos de la conservación sostenible, cada equipo seleccionado por la Universidad Cergy París, buscó entre sus contactos a otros grupos que fueran complementarios con los miembros del equipo inicial. También se consideró la propuesta de la Unión Europea de buscar grupos de investigación en una línea particular. En nuestro caso, climatólogos interesados en el estudio de impactos en América Central y América del Sur.

Tabla 1. Miembros del consorcio.

Actores académicos Europa	Universidades	Universidad Cergy París CY (Francia): El Laboratorio de Geociencias y Medio Ambiente (CY-GEC), es un grupo de Ciencias de la Tierra que trabaja con material del BCH. El Laboratorio CY-AGORA es un laboratorio de investigación sobre el análisis de sociedades y sus escritos.
		UNIMORE: Química en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Módena, y Reggio Emilia (Italia), especializada en análisis de sistemas ambientales con especial énfasis en el Análisis del Ciclo de Vida (LCA).
		UPV: El Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente de la Universidad de Pavía (Italia), tiene habilidades especiales en estudios de arqueometría, métodos y protocolos de diagnóstico, del patrimonio cultural.
		DTU: La Universidad Técnica de Dinamarca, Sección de Materiales y Durabilidad (Dinamarca), lleva mucho tiempo trabajando en la durabilidad de los ladrillos de arcilla.
	Centros de investigación	ISAC-CNR: La actividad de investigación del grupo de riesgos naturales, ambientales y antrópicos, del patrimonio cultural (Italia), tiene como objetivo evaluar, predecir y gestionar los riesgos naturales, ambientales y antropogénicos, inducidos por el cambio climático en el BCH.

Actores no académicos	México	Centros de investigación	IGEO: El Laboratorio de Petrofísica de la Unidad Técnica de Caracterización Física y Química de Materiales del Instituto de Geociencias IGEO (España), se dedica al estudio de geomateriales, con especial atención en la construcción y conservación del patrimonio.
	América	Universidades	UR: El grupo de investigación Interacciones Clima-Ecosistemas (ICE) de la Universidad del Rosario (Colombia), trabaja para identificar y evaluar, mediante métodos cuantitativos, las consecuencias para los ecosistemas, la sociedad y la biodiversidad, de las interacciones con el clima.
			UJAT: La Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (México), trabaja en la actividad fotocatalítica y antifúngica de nanopartículas, para su aplicación en el patrimonio cultural.
			UAC: El grupo de investigación del medio ambiente y degradación de materiales, de la Universidad Autónoma de Campeche (México), estudia la interacción entre los materiales de construcción y el medio ambiente.
			UPC: El grupo de biotecnología de la Universidad Politécnica del Centro (México), estudia el desarrollo de biopelículas en materiales de BCH y cómo evitarlo.
		Centros de investigación	CINVESTAV: El Laboratorio Nacional de Nano y Biomateriales (LANNBio) del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, plantel Mérida (México), trabaja en colaboración con el INAH en la investigación de soluciones basadas en nanopartículas para evitar la colonización biológica de sitios arqueológicos.
	Europa		GEA: Empresa de consultoría geológica y petrológica (España) su laboratorio científico cuenta con un amplio conocimiento sobre patrimonio cultural, arqueológico y de paisajes culturales.
			REMPART Federation (Francia) es el movimiento nacional francés que agrupa el mayor número de sitios y el más amplio radio de acción, trabajando activamente en la salvaguarda del patrimonio.
	México		INAH: El Instituto Nacional de Antropología e Historia es un organismo del gobierno federal mexicano (México) creado para garantizar la investigación, preservación, protección y promoción del patrimonio prehistórico, arqueológico, antropológico, histórico y paleontológico nacional.

Fuente: Elaboración propia.

El proyecto dispone de un consejo de asesores que apoya en la investigación, en las necesidades de los profesionales, así como sobre la evolución de las tendencias de la restauración y conservación. Este comité está formado por José María García Gómez, de la Dirección General de Vivienda y Rehabilitación de la comunidad de Madrid (España); Clément Lelièvre, del Instituto de Oficios de Albañilería, Los Compañeros del Deber (Francia); Iván Lafarge, de la Oficina de Patrimonio Arqueológico del Departamento de Seine-Saint-Denis (Francia), especialista en historia de la construcción y arqueología; Marie Laure Lavenir, directora general de ICOMOS International (Francia); Miloš Drdacký, presidente del Consejo de Investigación del Ministerio de Cultura y director del Departamento de Ciencias del Patrimonio del ITAM (República Checa); Bárbara Lubelli, del Departamento de Ingeniería Arquitectónica y Tecnología, de la Universidad Tecnológica de Delft (Países Bajos); así como Valerie Magar, responsable de la Unidad de Programas del Centro Internacional de Estudios de Conservación y Restauración de los Bienes Culturales (ICCROM) (México).

Objetivos

Los objetivos de SCORE, de acuerdo con el Programa RISE, son de investigación e innovación:

RI Obj. 1. El desarrollo de materiales y métodos verdes e innovadores para la conservación de edificios antiguos, que integren el concepto de economía circular y el

cambio climático, y limiten su huella ecológica (*ecological footprint*).

RI Obj. 2. Evaluación bidireccional de los impactos del medio ambiente sobre los materiales del patrimonio, así como de los materiales y métodos de restauración (su fabricación, aplicación y su "fin de vida") sobre el medio ambiente.

RI Obj. 3. Transferencia a la sociedad: Formación y difusión de los resultados.

Como se indica en el segundo objetivo RI, lo que nos interesa no es solo saber cómo el cambio climático va a afectar a estos edificios, sino también cómo estos edificios pueden resistir el cambio climático.

El tercer objetivo, no menos importante, es la transmisión de los resultados de este proyecto hacia la sociedad, tanto por actividades de formación práctica, en los cuales REMPART constituye una parte muy importante, como por cursos universitarios para los futuros profesionales de la conservación y restauración del patrimonio arquitectónico.

Un aspecto más de este punto es la transmisión de los resultados del proyecto a la sociedad y a la comunidad científica, mediante publicaciones propias o mediante artículos científicos, participación en congresos, talleres y otras actividades.

Asimismo, el programa MSCA RISE señala como objetivos específicos los siguientes:

SP Obj. 1. Desarrollar alianzas/redes internacionales, interdisciplinarias e intersectoriales.

SP Obj. 2. Facilitar el intercambio de personal de investigación e innovación.

SP Obj. 3. Compartir el conocimiento y los resultados de la investigación con los actores de la conservación del patrimonio arquitectónico y viceversa.

El primer objetivo específico es el desarrollo de alianzas o redes internacionales interdisciplinarias e intersectoriales, en las que participen científicos, académicos, así como organizaciones no gubernamentales, empresas, colectividades, etc. MSCA RISE financia, principalmente, intercambios de personal de investigación y de innovación, y permite compartir los resultados con los actores del patrimonio cultural, quienes tienen una misión importante: definir lo que se debe conservar.

En este sentido, los puntos fuertes del proyecto SCORE se pueden resumir en:

1. La adecuación de las necesidades del patrimonio cultural a los aspectos ecológicos, económicos y sociales, que involucra a todos los oficios de la construcción, los cuales son numerosos, extremadamente variados y complejos, y requieren de profesionales, además de mano de obra altamente calificada para los trabajos de concepción, ejecución y conservación.
2. Reducción del impacto medioambiental, ya que el patrimonio cultural tradicional europeo construido, puede contribuir potencialmente a reducir las emisiones hasta en 4 Mt CO_2/año.

Tipos de patrimonio estudiado

Una cuestión importante es qué tipo de edificios estudiar. En Europa decidimos trabajar sobre el patrimonio menos protegido: el vernáculo, es decir, las granjas antiguas, las casas de campo o de ciudades, molinos, etc. Al estar menos cuidado por los organismos oficiales, su riesgo de perderse es mayor. Por ejemplo, el propietario de una granja que

no está adaptada a la tecnología utilizada, puede decidir destruirla para construir una casa nueva o una granja nueva. Otro ejemplo es la sustitución de ventanas y puertas de madera por otras de PVC, que son más económicas pero pueden tener consecuencias dañinas para los edificios, como la aparición de humedad o la destrucción del estuco antiguo. Por otra parte, como en el equipo había miembros de países de América Latina, como Colombia y México, en este último seleccionamos el patrimonio arqueológico por su interés cultural, extensión y cantidad, ya que cuenta con alrededor de 25 mil sitios arqueológicos prehispánicos, lo que hace difícil y costoso mantener este patrimonio.

En SCORE se trabaja sobre patrimonio cultural que se encuentra en dos climas diferentes, según la clasificación Köppen-Geiger de 2020: en un clima tipo C, templado, con diferentes variedades como en Europa; y un clima tipo A, tropical, de invierno seco, registrado en México, lo que nos permite hacer ensayos comparativos. Otro aspecto importante es que estos sitios van a sufrir una evolución climática diferente en el futuro, como puede comprobarse en Beck *et al.* (2018).

En la Tabla 2 se presentan los casos de estudio seleccionados para el proyecto. Los casos son variados: una zona agrícola cerca de París que presenta un desarrollo urbano que se debe controlar y donde los edificios están construidos con calizas locales; en Madrid, se trata de una zona rural abandonada que cuenta con construcciones en piedra; en Cremona, una región donde se utilizan principalmente ladrillos cocidos y morteros de tierra; en Dinamarca trabajan también sobre ladrillos, principalmente sobre la reutilización de ladrillos antiguos en lugar de remplazarlos; asimismo, las islas Eolias, o Eólicas, se seleccionaron por sus terrazas de piedra seca, utilizadas para el cultivo. Otro sitio de Francia es el castillo de Coucy, restaurado por los voluntarios de REMPART, que representa un caso de restauración asociativa. En México trabajamos en la península de Yucatán, en los yacimientos arqueológicos de Chichén Itzá y Oxpemul, este último en la reserva de la biosfera de Calakmul. Estos dos casos presentan condiciones muy diferentes de restauración y también de condiciones medioambientales.

Tabla 2. Casos de estudio.

	Descripción de los casos de estudio
Vexin Français	Situada aproximadamente a 70 kilómetros de París, esta zona periurbana se caracteriza por una importante actividad agrícola y por el desarrollo de zonas habitadas, lo que conlleva dos problemas principales: (i) el riesgo de modificación de los paisajes rurales, y (ii) la reutilización de edificios antiguos, casas, granjas y otros, como viviendas o edificios públicos. SCORE estudiará los materiales y métodos de construcción locales y su potencial de replicabilidad en la conservación del patrimonio construido. El intercambio de conocimientos con los agentes locales se verá facilitado por la red ya establecida por CY y el Parque Natural Regional de Vexin Français.
Madrid Comunidad de Madrid, centro de España.	La Dirección General de Vivienda y Rehabilitación (DGVR) aporta fondos al proyecto de valorización patrimonial, para la Recuperación Urbana Integrada del Casco Antiguo y Bienes Urbanos Homogéneos. Apoya más de 30 proyectos centrados en el desarrollo de pueblos rurales, entre ellos nuestro caso de estudio. El análisis de algunos casos, como el de Patones de Arriba, permite poner de manifiesto los aspectos económicos y ambientalmente beneficiosos del proyecto, analizando las técnicas y materiales de conservación, y el impacto ambiental. La colaboración con la DGVR de Madrid apoyará el intercambio de conocimientos con los actores locales.
Cremona	Situado en el norte de Italia, en el pueblo y sus alrededores, es común encontrar mamposterías hechas de ladrillos cocidos y morteros de tierra, tanto en edificios rurales como importantes. Esta técnica se utilizó en Cremona desde la época romana y hasta las primeras décadas del siglo XX. SCORE se basará en este método para desarrollar nuevas técnicas de restauración, teniendo en cuenta el impacto ambiental. La Universidad de Pavía apoya el intercambio de conocimientos con los actores locales.
Dinamarca	El material más utilizado en esta región para las fachadas externas, tanto en monumentos como en edificios vernáculos, es la mampostería compuesta por ladrillos de arcilla cocida y mortero. DTU se centrará en el desarrollo de un nuevo método para evaluar la condición de los ladrillos de arcilla, que proporcionará una estimación de la vida útil restante del material y garantizará un mejor uso de los recursos, al mantener los materiales en el edificio durante el mayor tiempo posible. Se utilizan estudios de casos locales para demostrar la eficiencia del nuevo método y para compartir conocimientos.
Islas Eolias	Sudoeste de Italia, Patrimonio de la Humanidad de la UNESCO y Red Natura 2000. Es uno de los sitios volcánicos más estudiados y monitoreados del mundo. El paisaje actual de las islas Eolias se caracteriza por la presencia de terrazas agrícolas de muros de piedra seca, en su mayoría abandonadas, y típicas viviendas modulares blancas, en el paseo marítimo y en la ladera. Este sitio ofrece grandes oportunidades para que SCORE (CNR-ISAC) desarrolle métodos de conservación innovadores, que tengan en cuenta las limitaciones ambientales específicas y que se compartirán con las partes interesadas locales italianas.
Périllos Coucy	El pueblo abandonado de Périllos, al sureste de Francia, restaurado por la asociación Terre de Pierre, ofrece un marco ideal para implementar la mampostería tradicional en un entorno mediterráneo. El castillo de Coucy, situado en el norte de Francia, ha sido restaurado desde 1980 por la asociación Mise en Valeur du Château, de Coucy. Los miembros de REMPART prestan gran atención a la preservación de los conocimientos técnicos de construcción antiguos, el uso de un mínimo de agua, de materiales locales, así como la reutilización de materiales. SCORE analizará los métodos empleados a la luz de las condiciones climáticas, con el fin de desarrollar nuevos métodos de restauración que serán implementados por los actores locales.
Chichén Itzá	Patrimonio de la Humanidad (850-1200 d.C.), es el sitio arqueológico más representativo de Yucatán (México) por registrar dos estilos arquitectónicos diferentes (puuc y tolteca), se caracteriza por la presencia de impresionantes representaciones iconográficas talladas en piedra caliza, yesos estucados y acabados policromados. Con el fin de evitar la pérdida de superficies arquitectónicas, SCORE experimentará metodologías de conservación innovadoras y materiales, compatibles con los sustratos originales y respetarán las limitaciones locales. El INAH garantizará la transferencia de conocimientos a los actores locales.
Oxpemul	Sitio arqueológico ubicado en el centro de la Reserva de la Biosfera de Calakmul, cuenta con numerosas estructuras y estelas con textos jeroglíficos tallados en bloques de piedra caliza y canteras prehispánicas. El ambiente cambiante genera condiciones particulares que permiten la acción de microorganismos en la degradación de la piedra caliza de registros históricos muy importantes, sobre las antiguas comunidades de las tierras bajas mayas. SCORE desarrollará nuevos métodos que impliquen la prueba *in situ* de tratamientos innovadores para evaluar su comportamiento frente a la acción de microorganismos. La Universidad Autónoma de Campeche garantizará la transferencia de conocimiento a las partes interesadas locales.

Fuente: Elaboración propia.

Metodología

Para alcanzar los objetivos de investigación e innovación, el Proyecto SCORE implementa una metodología que consiste en trabajar a través de "bucles de implementación", como se detalla en la Figura 1, y que se aplicará a estudios de caso seleccionados:

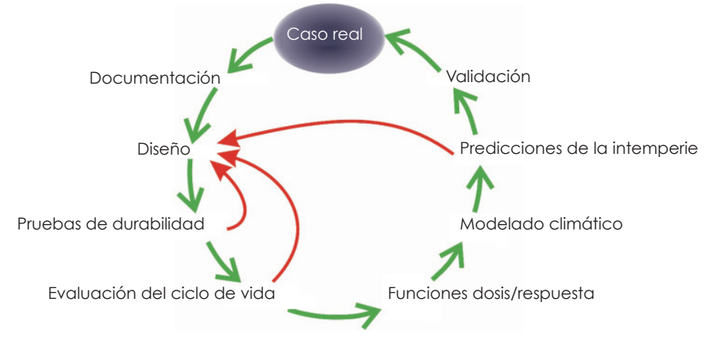


Figura 1. Metodología del Proyecto SCORE. Fuente: Elaboración propia.

1. Revisión bibliográfica, documental y estudio *in situ* de los edificios y sitios: Un profundo conocimiento de las tipologías, materiales y técnicas constructivas, es la base de nuestro estudio. El papel de arqueólogos, historiadores e historiadores de la arquitectura, es fundamental en este tipo de proyectos. Se emplean diferentes técnicas de investigación y se consultan todas las fuentes disponibles. Se proponen programas de valorización de edificios.
2. Estudios de laboratorio y en el lugar, para caracterizar con precisión los materiales antiguos, su grado de conservación, composición y propiedades físicas.
3. Diseño de nuevos materiales. Los estudios de los materiales existentes son la base para el diseño de nuevos materiales sostenibles: morteros y revocos, ladrillos, consolidantes, hidrófugos, biocidas, etcétera.
4. Ensayos de durabilidad en laboratorio e *in situ*. Estos estudios ayudan a determinar el comportamiento, a largo plazo, de materiales antiguos y nuevos en diferentes condiciones ambientales. A partir de los resultados obtenidos, se podrán revisar las formulaciones. (Volver al inciso 3.)
5. Impacto ambiental y características ecológicas de los materiales y métodos de conservación. Se utiliza la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (LCA). Los resultados de los diferentes indicadores ambientales (emisión de CO_2, cambio climático, consumo de agua, uso del suelo, ecotoxicidad, etc.), se utilizan para revisar las formulaciones propuestas. (Volver al inciso 3.)
6. Los resultados de las pruebas de durabilidad se utilizan para establecer nuevas funciones de dosis-respuesta. Éstas permitirán cuantificar el efecto de los continuos cambios climáticos (temperatura, humedad relativa, etc.), pero también de los eventos extremos (periodos secos, inundaciones, tormentas, etc.) en la conservación del patrimonio.
7. Los datos climáticos pasados y las simulaciones de modelos climáticos para tiempos posteriores, nos permiten conocer las condiciones climáticas futuras y sus diferencias con las pasadas. Las comparaciones entre las diferentes áreas estudiadas (América Latina, norte y sur de Europa), ayudan a comprender mejor el comportamiento pasado y futuro de los materiales del patrimonio cultural.
8. La meteorización pasada, actual y futura de los materiales, se determina utilizando funciones de dosis-respuesta y "predicciones" de modelos climáticos. Las formulaciones serán aprobadas o rediseñadas en función de los resultados obtenidos. (Volver al inciso 3.)
9. Validación de nuevos materiales y métodos. Si el producto cumple con todas las condiciones requeridas: compatible con los materiales existentes, respetuoso con el medio ambiente y durable en condiciones presentes y futuras, se puede aplicar en campañas de restauración de casos reales. Los criterios de validación estarán predefinidos con respecto a los materiales tradicionales, es decir: reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 30 por ciento, reducir el consumo de agua en un 20 por ciento, tener al menos la misma durabilidad y compatibilidad, ser reversible responder a los aspectos estéticos.

Resultados

Uno de los resultados principales de este proyecto fue la creación de una red internacional de investigadores y profesionales del patrimonio construido, al consolidarse relaciones ya existentes, además de establecer nuevas colaboraciones entre todos los participantes. Al final del proyecto, en octubre de 2025, habrán tenido lugar 35 estancias de investigadores en centros de otros integrantes del programa, entre ellas, cuatro de profesores mexicanos que colaboran en Francia e Italia.

Otros resultados son proyectos de valorización del patrimonio del Vexin Français que han sido realizados por los estudiantes de la Licenciatura en Conservación y mejora del patrimonio construido, que puede consultarse en *https://lp-pmvpb.fr/projets-des-etudiants* . Estas memorias han sido traducidas al inglés y pueden consultarse en el repositorio ZENODO.

La mayor parte de los resultados obtenidos no se han publicado aún, pero varios artículos ya están en sitios electrónicos: uno sobre un método para preseleccionar morteros de restauración: Díaz-Basteris, José; Menéndez Beatriz; Reyes, Javier, y Sacramento Rivero, Julio C. (2022). A Selection Method for Restoration Mortars Using Sustainability and Compatibility Criteria. *Geosciences*, 12(10), 362, en *https://doi.org/10.3390/geosciences12100362*

Un artículo sobre el impacto del cambio climático y de polución sobre la degradación de los materiales: Esteban-Cantillo, Óscar Julián; Menéndez, Beatriz, y Quesada, Benjamín. (15/04/2024). Climate change and air pollution impacts on cultural heritage building materials in Europe and Mexico. *Science of the Total Environment*. Volume 921. En *https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170945*

Dos artículos sobre el uso de nanopartículas en la conservación del patrimonio arqueológico: Reyes-Trujeque, Javier; García-Reyes, Aketzali A.; Lázaro-Mass, Stephania; Quintana, Patricia; García-Solís, Claudia, y Soria-Castro, Montserrat. (2024). Characterization of limestone and its behavior in different conditions after treatment with $CaZn_2(OH)6 \cdot 2H_2O$ nanoparticles. En *https://doi.org/10.1007/s11051-024-06154-5*

Y De la Rosa-García, Susana; Sierra-Fernández, Aránzazu; García Solís, Claudia; Soberanes García, Neftalí; Quintana, Patricia; Gómez-Cornelio, Sergio, y Fort, Rafael. (01/01/2024). Fungal community dynamics on limestone at the Chichén Itzá archaeological site in Mexico driven by protective treatments. *Science of the Total Environment*, Volumen 906. En *https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167563*

Este proyecto también ha generado varios cursos, coloquios, seminarios, entre otros, presentados por los científicos visitantes durante sus estancias. Estos eventos han tenido lugar principalmente en Campeche, México, y en Lipari, Italia.

Fuentes de información

Köppen-Geiger (2020). *World Map of the Köppen-Geiger climate classification* disponible en *http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at* Consultado en abril de 2020.

Mesa 6
La gerencia de proyectos en la conservación del patrimonio cultural







Moderador: **Ing. Salvador Fernández del Castillo Flores**
Integrante del Comité Técnico de Desarrollo Urbano Sustentable y de Turismo del Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM)

Secretaria: **Ing. Ana Fernanda González Cruz**
Integrante del Comité Técnico de Desarrollo Urbano Sustentable y de Turismo del CICM

Para mayor detalle escanea el código QR y podrás ver la transmisión completa de esta sección del Encuentro México y Francia

Crédito: CICM-imagen en evento. Esta página





La conservación del patrimonio en los grandes proyectos urbanos. Ejemplo en la Ciudad de México
Arq. Benjamín Romano
Arquitecto fundador del despacho LBR&A



El Plan de Seguridad de las Catedrales en Francia a partir de 2020
Mtro. Jean-François Duarte-Paixao
Teniente Coronel de la Brigada de Bomberos de París, Ministerio de Cultura de Francia



Tecnologías recientes en la Gerencia de Proyectos de Conservación del Patrimonio
Ing. Oscar Solís Yépez
Director General de ACONSA y Asociados Consultores, S de RL de CV



Actualización de tecnología de obras históricas
Ing. Francisco Ramos Kuri
Director General de Conservación Pilotes de Control, SA

Nota: Imágenes con enlace Web fueron transmitidas por INAH TV durante el evento realizado en el Auditorio Jaime Torres Bodet (Museo Nacional de Antropología).

Crédito: CICM-imagen en evento. Esta página
Excepto retratos oficiales de ponentes.

La Gerencia de Proyectos en la conservación de monumentos históricos y culturales

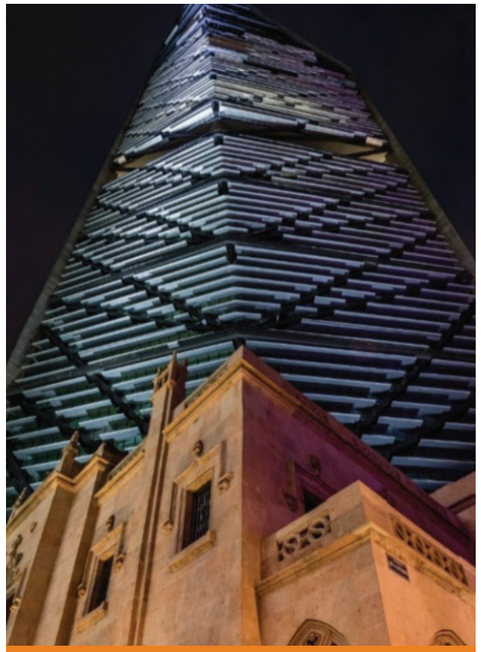
Las distintas fases del rescate de monumentos deben atenderse a través de un liderazgo y coordinación efectiva de recursos y voluntades, con el suficiente conocimiento y capacidad. La detección precisa del problema a resolver, los levantamientos físicos, la asesoría de expertos, la elección de la solución más conveniente, la incorporación y coordinación de los actores, la supervisión, y el control físico y financiero, son, entre otros, aspectos que pueden llegar a ser muy complejos, lo que hace necesario contar con la organización y un liderazgo con suficiente autoridad y conocimiento, que permita llevar a cabo las acciones con éxito y oportunidad.

- La Gerencia de Proyectos es una especialidad que requiere metodología y sistematización muy bien estudiadas, a las que se incorporan las herramientas tecnológicas más convenientes. El ingeniero Oscar Solís Yépez, reconocido experto en el tema, expondrá los avances más recientes en ese campo.

Se presentarán algunos ejemplos exitosos de la Gerencia de Proyectos en México, que requirieron una excepcional capacidad y coordinación.

- El rescate de una residencia con valor cultural ubicada en la avenida Paseo de la Reforma, en la Ciudad de México, que se desplazó para construir la cimentación de la Torre Reforma, nominado en 2018 como el mejor rascacielos del mundo. El inmueble se reubicó, posteriormente, en su sitio original. La exposición la hará su autor, el arquitecto Benjamín Romano.
- La renivelación y elevación integral del convento de Capuchinas en la Villa de Guadalupe, construcción de mampostería del siglo XVIII, fuertemente desnivelada y hundida 3.50 metros. Expondrá el tema el ingeniero Francisco Ramos Kuri.
- La experiencia francesa con el Plan de Conservación para las Catedrales en Francia será presentada por Jean-François Duarte Paixao, consejero de la Misión de Seguridad y de la Accesibilidad del Ministerio de Cultura (DIRI, por sus siglas en francés), de manera virtual desde el país galo.

Moderador: **Ing. Salvador Fernández del Castillo Flores**







Colegio de las Vizcaínas - Jardín LAC

Imagen 1 y 2. Vista de Torre Reforma. Fuente: Benjamín Romano.
Imagen 3. Vista del Colegio de las Vizcaínas. Fuente: Benjamín Romano.

La conservación del patrimonio en los grandes proyectos urbanos. Ejemplo en la Ciudad de México

Arq. Benjamín Romano

Muchas gracias por su invitación, me da mucho gusto y orgullo poder colaborar en este foro.

La Torre Reforma

Me invitaron a hablar sobre los problemas de gerenciamiento para un proyecto que incluya la preservación del patrimonio inmobiliario. Por supuesto, me pareció importante hablar del desplazamiento temporal de la casona para la construcción de la Torre Reforma.

Cuando los inversionistas me invitaron a ver el sitio donde pretendían construir un edificio de oficinas, me encontré con la difícil tarea de lidiar con una casona con valor histórico rescatable; pero también me encontré con un predio magníficamente ubicado sobre Paseo de la Reforma, cercano a los principales íconos urbanos del país y con visuales hacia el exterior por demás interesantes.

En aquel entonces, entramos a la casona, la revisamos y encontramos pésimas intervenciones arquitectónicas, además de una serie de elementos decorativos de poca calidad, que fueron diseñados para un establecimiento nocturno llamado El Living, que sustituyó al entonces restaurante El Divino, cerrado años atrás. Esas intervenciones reflejaban una serie de capa sobre capa de malas decoraciones. Nada funcionaba bien…

Mi comentario fue contundente: "Adquieran el sitio porque es perfecto para el edificio de oficinas que pretenden hacer, y les ofrezco que de la casona yo me encargo, aunque la tengamos que mover". Confieso que no dimensioné mi aseveración y cuando llegó el momento de definir el proceso para desplazarla, nos encontramos en medio de una difícil encrucijada.

Al analizar el contexto urbano, me percaté de la presencia de Torre Mayor al poniente; también me preocuparon los eventuales vecinos que habría hacia el oriente. Estudié las visuales hacia y desde el predio, siempre con la casona en mi mente.

Desde mis primeros croquis del partido arquitectónico (imagen), entendí los elementos urbanos, el programa y sus flujos, las visuales, el emplazamiento y la eventual estructuración. El análisis me llevó a entender que la estructuración del edificio debía comprometer únicamente a los muros de la colindancia y una parte posterior del predio, porque apoyarme en la casona, nunca fue opción. También comprendí que una estructura en

forma de libro abierto nos permitiría tener una estabilidad sólida, si lo veíamos como un origami tectónico. Las construcciones tectónicas son muy utilizadas en la Ciudad de México lográndose preservar muchas de ellas, pese a la sismicidad de la zona.

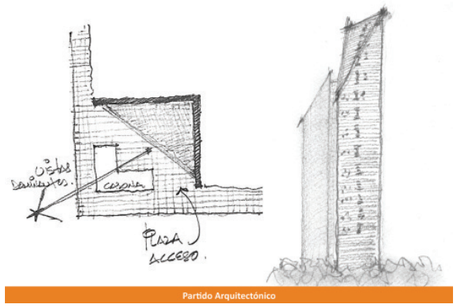
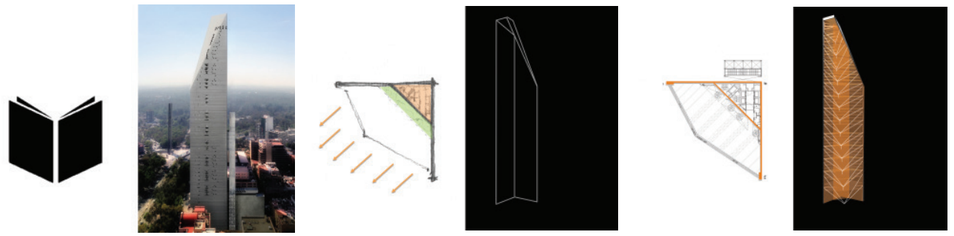


Figura 1. Dibujo para Torre Reforma. Fuente: Benjamín Romano.

La esbeltez del muro de concreto en conjunto con la retícula diagonal (diagrid), que diseñamos con el doctor Rodolfo Valles, formaron un tubo esbelto con espacios interiores libres de columnas. Seccionamos parte del tubo para ubicar los flujos del edificio, haciendo una clara separación entre el espacio servido y espacio servidor.

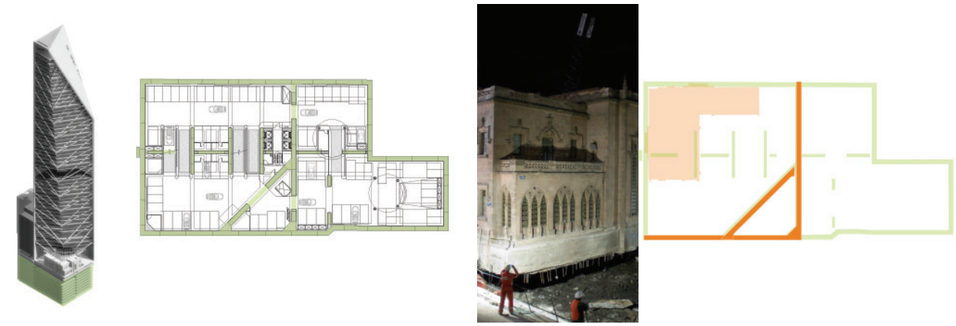
La normatividad aplicable en materia de estacionamientos, nos impuso la necesidad de diseñar un espacio para mil cien automóviles, lo que nos obligó a construir un iceberg de nueve sótanos, el cual funcionó como cimentación por sustitución de la torre.



Figuras 2, 3 y 4. Diseños para Torre Reforma. Imagen 4. Fuente: Benjamín Romano.

El estacionamiento es totalmente funcional, aunque cabe decir que tiene embebidos los muros propios de la torre que transmiten la carga a la cimentación. Todas las losas del estacionamiento funcionan como diafragmas resistentes a los esfuerzos laterales de la excavación, con excepción de la losa nivel cero, que fue diseñada para trabajar como una charola de concreto con la que desplazamos la casona.

La charola de concreto es una idea que salió tras innumerables reuniones matutinas con el doctor Roberto Meli, el maestro Enrique Santoyo, el doctor Rodolfo Valles y yo, en la época en que la casona aún funcionaba como centro nocturno. En una de esas reuniones me percaté de una charola que había con copas vacías de la noche anterior y entendí el proceso para desplazarla. A todos les gustó la idea y de ahí se empezó a desarrollar la ingeniería.



Figuras 5 y 6. Diseños para Torre Reforma. Imagen 5. Fuente: Benjamín Romano.

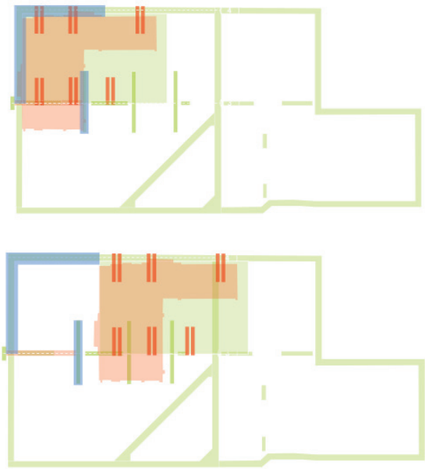
Ranuramos la cimentación original de cantera de la casa, para pasar las varillas que formaron las nervaduras de una losa reticular (*waffle slab*). Los ingenieros diseñaron unos capiteles en el armado de la losa, en los cuales ahogamos unos elementos metálicos para mandar hacia afuera de la charola el peso de la casona, para poder desplazarla. A estos elementos los llamamos "cleopatras", por la imagen de la reina egipcia cuando era transportada. Sobre los muros Milán (*shear walls*) de cimentación, se apoyaron unos rieles por los que se desplazó la charola con la casona, por medio de unos patines hidráulicos (*skid shoes*). Una vez concluido el desplazamiento, construimos los muros Milán que faltaban para cerrar el cajón (*iceberg*) de cimentación. Seis semanas después, regresamos la casa a su ubicación original. Posteriormente iniciamos la excavación de los nueve sótanos con el sistema *top-down*, el cual toma ventaja del diafragma que generan las losas de concreto de cada sótano, para excavar por debajo de la losa hasta llegar al nivel de la siguiente para colarla y obtener los beneficios estructurales del nuevo diafragma.



Figuras 7 y 8. Diseños y fotografías para Torre Reforma. Fuente: Benjamín Romano.

La casa fue conservada integrándola al proyecto como elemento para delimitar el lobby del edificio en la esquina sur, volviéndose parte integral del proyecto. Es interesante notar que la torre se va inclinando por encima de la casona paulatinamente, llegando a volar hasta 14 metros sobre ella en la parte más alta. El cantiléver, o voladizo, se logra deformando la retícula diagonal.

La existencia de un semisótano en la casa dificultaba el desplazamiento, por lo que se solicitó al Instituto Nacional de Bellas Artes y Literatura (INBAL) permiso para demolerlo. Para eso, construimos un muro de concreto adyacente a la fachada que funcionó como conjunto de trabes peraltadas, que tomaron el cantiléver generado por la demolición del semisótano donde se cimentaba. El espacio se utilizó como acceso al sótano comercial del edificio.





Figuras 9 y10. Diseños y fotografías para Torre Reforma. Fuente: Benjamín Romano.

Afortunadamente todo funcionó muy bien, pero si hablamos de la gestión del proyecto, tendríamos que hablar de los posibles inconvenientes generados durante un proceso tan complicado. El desarrollo acertado de las ingenierías, la exitosa selección del proceso de desplazamiento, la responsabilidad ante las autoridades, propietarios, financieros y vecinos, así como la responsabilidad profesional de este acto, es algo de lo que nunca se habla.

En mi caso, tengo que confesar que la adrenalina que me acompañó durante todo el proceso, me volvió insensible ante la posibilidad de un fracaso. Sin embargo, en ocasiones me pregunto: ¿qué hubiera pasado si algo fallaba?

La gestión del proyecto en el marco de la conservación del patrimonio urbano es una obligación profesional, pero que la responsabilidad debería ser compartida entre todos los involucrados.

El Colegio de las Vizcaínas

Me permití incluir un segundo proyecto de una escala distinta, es un trabajo en colaboración con Fernanda de la Mora y Ariela Chazan.

El Colegio de las Vizcaínas (Colegio de San Ignacio de Loyola Vizcaínas) es un edificio con 258 años de historia y fue construido como un colegio para educar a las señoritas vascas que venían a América. Hoy sigue funcionando como colegio mixto, con un alto

sentido de beneficencia, en una manzana completa de 17 mil 500 metros cuadrados del Centro Histórico de la Ciudad de México.

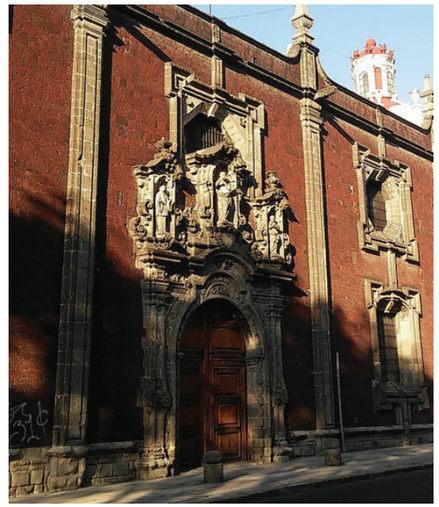


Imagen 6. Vista de la fachada del Colegio de las Vizcaínas. Fuente: Benjamín Romano. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3° de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=3yPIU_XZkcSBmon_&t=6586*

El Colegio financia su labor social gracias a las rentas del patio central para bodas y eventos, con un serio problema de estacionamiento, razón por la que me invitaron a pensar en cómo resolver esa situación.

Cuando me invitaron a Vizcaínas, me maravillé del edificio colonial, me impresionaron sus espacios formados por muros tallados en cantera, sus patios, su capilla, el museo de sitio y demás lugares maravillosos, que tienen debidamente resguardados. La presencia arquitectónica del Colegio me hizo pensar en lo ridículo que sería pensar solamente en un estacionamiento.

Fiel a mi formación profesional, empecé recorriendo el sitio con su entorno urbano y me conflictuó sobremanera el desastroso vecindario que rodea a la institución: vendedores ambulantes, paredes de cantera grafiteadas, miseria, basura, etc., y todo esto, contrastando con un hermoso edificio.

Le propuse al patronato del Colegio de las Vizcaínas, aprovechar la construcción del estacionamiento para detonar un mejoramiento del entorno, para rescatar el valor inmobiliario de la edificación colonial.

Hoy tengo el orgullo de ser el primer patrono no vasco del Colegio y, en conjunto con los demás miembros del patronato, diseñamos el rescate del edificio. Pensamos dignificarlo recuperando sus fachadas, mejorando sus plazas y peatonalizando las calles que lo rodean.


Con más de 256 años de Historia



Colegio de las Vizcaínas - Puerta Sur del Centro Histórico

Imagen 10, 11, 12 y 13. Vistas del Colegio de las Vizcaínas. Fuente: Benjamín Romano. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.
Imagen 14. Render para el Jardín LAC Vizcaínas Fuente: Benjamín Romano. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=zyq2hxfQkczq35We&t=6480*

Entendimos la importancia de mejorar el tejido social del entorno inmediato, para lograr una dignificación urbana adecuada. El Colegio me encomendó la adaptación del Patio de los Cedros junto con algunas crujías circundantes, para construir un proyecto denominado Jardín LAC Vizcaínas, que abrirá sus puertas como jardín y biblioteca pública gratuita a finales de este año.

También queremos revivir el comercio digno de antaño en los locales comerciales que rodean el edificio y abrir al público la huerta (vergel) del Colegio. Propusimos un destino turístico gourmet, sin dejar a un lado la visión educativa con la que fue creada y mantenida la institución.

Hoy tenemos permisos del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), del INBAL y de las distintas autoridades de la Ciudad de México para el proyecto.

Después de una gran colaboración con el INAH, definimos la intervención del Jardín LAC Vizcaínas como si construyéramos un mueble metálico que entreteje el interior con el exterior, adaptándose a los distintos usos del proyecto: el acervo de libros, el salón de eventos, el área de lectura para niños y adultos, así como una gran escalinata que se desdobla en el patio, que servirá para dar pláticas y conferencias. Este mueble metálico tiene la tarea de soportar un pesado volumen de libros y de la gente, por lo que decidimos apoyarlo directamente al suelo, separándolo estructuralmente del edificio colonial y apoyándolo por medio de minipilotes, separándonos totalmente de la estabilidad original del edificio colonial.


Jardín LAC Proceso de Obra

Imagen 15. Proceso de obra de la intervención del Jardín LAC Vizcaínas. Fuente: Benjamín Romano. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=DjKQbhjc_8hB8hJd&t=6702*

Estamos en proceso de obra de la mano del INAH y confiamos en terminar la construcción en septiembre, para abrir las puertas al público a fin de año, cuando esperamos que la gente entre a leer, a escuchar una conferencia o simplemente a pasear por el jardín. Dentro de poco, esperamos lograr el sueño de haber mejorado el entorno social de Vizcaínas.

Al respecto, en una de las pláticas que se dieron ayer, dijeron que el gobierno francés tenía un fondo económico para ayudar este tipo de rescates del patrimonio inmobiliario.

Aquí en México no existe ningún fondo de este tipo. Los propietarios y desarrolladores tenemos que buscar los permisos, el dinero y las oportunidades.

*Fotografías/*slides*/gráficas tomadas de presentación compartida para el Encuentro por parte de Benjamín Romano.

El Plan de Seguridad de las Catedrales en Francia a partir de 2020

Mtro. Jean-François Duarte-Paixao

En 2020, el Ministerio de Cultura francés elaboró un plan de seguridad para acompañar a los diferentes servicios del Estado, en un ambicioso programa dirigido a mejorar el nivel de seguridad de las catedrales, edificios de gran valor patrimonial en el país.

Estoy adscrito por la Brigada de Bomberos de París al Ministerio de Cultura, en el seno de la Delegación de Inspección, Investigación e Innovación, junto con otros tres bomberos de París y tres policías, para asesorar a los diferentes departamentos del Ministerio en los proyectos de construcción, renovación o mejora del nivel de seguridad de edificios pertenecientes al Estado o con un gran valor patrimonial.

El riesgo de incendio en edificios antiguos es un tema que el gobierno francés ha seguido con atención durante mucho tiempo. Entre los incendios importantes que han marcado la historia del patrimonio cultural francés, cabe citar:

- El incendio del ala de las Tullerías del Palacio del Louvre en 1871 durante los episodios de la Comuna, que provocó la destrucción completa de un cuerpo del edificio histórico.
- El incendio del Parlamento de Bretaña en 1994, durante una manifestación que provocó la destrucción completa de su cubierta y de gran parte de sus estructuras.
- Y recientemente, incendios en templos y catedrales, como la iglesia de Saint-Omer, en el norte de Francia, cuyo tejado entero fue destruido por un incendio provocado, en septiembre de 2024 cuando el edificio acababa de ser renovado.

Estos incendios, repetidos y de consecuencias importantes, hacen que el riesgo de siniestros sea una preocupación importante del Estado francés y, en particular, del Ministerio de Cultura, para la protección de los edificios que le pertenecen, en especial de las catedrales.

Para presentar el Plan de Seguridad de las Catedrales, es necesario precisar previamente las particularidades francesas que se toman en cuenta en el riesgo de incendio. Por lo tanto, será una presentación en tres partes:

- El marco reglamentario y normativo francés contra el riesgo de incendio;
- El papel de los bomberos en Francia para la prevención del riesgo de incendio;
- Y el Plan de Seguridad de las Catedrales: su génesis, su balance al cabo de cinco años y sus perspectivas.

El marco reglamentario y normativo francés contra el riesgo de incendio

Los textos franceses son muy densos, completos, y la seguridad contra incendios se encuentra en gran cantidad de documentos; en particular, en el Código de construcción y de la vivienda, que define, entre otros puntos, que éstos deben implantarse, construirse y explotarse en los edificios, para garantizar la seguridad de las personas, evitando el inicio del fuego, y de producirse, limitar sus efectos.

El Código introduce normas de seguridad relativas a los edificios de viviendas, a los establecimientos que acogen al público, para los edificios de altura media y alta, pero también para los edificios de uso profesional, las instalaciones clasificadas y también reglas para la organización de manifestaciones, o grandes reuniones. Por lo tanto, se cuenta con un arsenal reglamentario bastante rico, que cubre todo el espectro del campo de la construcción.

Las catedrales están reguladas por el Reglamento de seguridad para establecimientos que reciben visitantes, en el que se establecen las disposiciones administrativas, constructivas, organizativas y técnicas necesarias, para garantizar la seguridad de los ocupantes.

Para el cumplimiento de estas disposiciones, la gran particularidad francesa es una organización bicéfala con la fuerza pública, por un lado, y organismos o personas que son reconocidos por su competencia, por otro. Ambos organismos realizarán controles en los edificios durante su construcción y, periódicamente, a lo largo de su vida.



Figura 1. El papel de los bomberos en Francia en el control de las normas de construcción. Fuente: Elaboración propia.

Este control del cumplimiento de las normas de seguridad contra incendios se hace *a priori* y *a posteriori*. *A priori* es en el momento de los permisos de construcción. Estas autorizaciones están sujetas a la autoridad policial; mientras que el cumplimiento de las normas de seguridad contra incendios, es verificado por los bomberos mediante una comisión de seguridad. En Francia, en el Cuerpo de Bomberos hay prevencionistas, cuyo

trabajo es estudiar todos los expedientes de permisos de construcción y verificar que los proyectos cumplen con los requisitos reglamentarios y normativos.

En el control *a posteriori*, en especial para los edificios que atienden público, la comisión de seguridad es la encargada de realizar los controles periódicos y emitir los dictámenes, favorables o desfavorables, con respecto al mantenimiento de su actividad (que puede llegar hasta órdenes de cierre del establecimiento, no abrirlo más al público hasta que se hayan realizado los trabajos de mejora de la seguridad). En el caso de las instituciones religiosas, como las catedrales, la inspección se realiza cada cinco años.

Esta especificidad hace que los bomberos tengan un papel importante en la verificación constructiva en Francia, y por ello el Ministerio de Cultura dispone de tres bomberos en todo momento para proporcionar asesoramiento sobre prevención, a fin de garantizar que los edificios que se construyan no sólo sean seguros para las personas, sino también para la seguridad del patrimonio. El objetivo de los reglamentos existentes es tener la certeza de que las personas tengan las condiciones satisfactorias de seguridad. De esta manera, la protección del edificio o de los bienes que albergan sólo se logra por los efectos relacionados con las medidas que se aplican para la seguridad de las personas. No hay requisitos específicos para la protección del patrimonio o de los edificios.

El Plan de Seguridad de las Catedrales

En 2019, como ya se ha mencionado en este coloquio, ocurrió el incendio de la Catedral de Notre Dame que generó muchos interrogantes también para los bomberos, y especialmente para mí, que servía en la Oficina de Prevención de la Brigada de Bomberos de París como jefe del departamento de la ciudad, además de ser uno de los últimos prevencionistas en visitarla antes del incendio.

Notre Dame de París era el buque insignia francés en materia de seguridad contra incendios antes del siniestro; es decir, que era el edificio mejor protegido porque se hizo un trabajo de mejora de la seguridad del edificio en el año 2000, que involucró la renovación completa del sistema eléctrico, la instalación de un sistema automático de detección de incendios, especialmente en el "bosque", esto es en la estructura; además de la presencia de agentes de seguridad contra incendios las 24 horas del día, en el sitio. Esto no existía en ningún otro lugar, en ninguna de las otras catedrales de Francia. El nivel de seguridad de Notre Dame era muy superior al requerido para la seguridad de los ocupantes.

El Estado en Francia es propietario de 87 catedrales y dos basílicas, por tanto 89 establecimientos que son seguidos por mis colegas. Después del incendio de Notre Dame, el Ministerio de Cultura pidió que se reflexionara sobre cómo mejorar el nivel de seguridad de las otras catedrales; no bajo el prisma de la seguridad pública, ya que existe la comisión de seguridad para ello, sino desde la visión de la protección del patrimonio, de la protección del edificio y de lo que alberga.

Durante 18 meses, se llevaron a cabo investigaciones para identificar puntos recurrentes, problemas que podían encontrarse en casi toda Francia, y un primer Plan de Seguridad de las Catedrales fue establecido en octubre de 2020. El programa incluía

ocho temas con 47 acciones, que permitían preguntarse si la institución estaba adecuadamente protegida o si había algo qué hacer. Se realizó un primer balance en marzo de 2023, una evaluación de los tres primeros años de seguimiento del Plan de Seguridad de las Catedrales y se creó una segunda versión del plan, esta vez con 58 acciones.

Los ocho temas son fáciles de comprender y abarcan las esferas de la prevención del riesgo, su reducción, pero también incluyen medidas organizativas y de previsión operativa. El Plan de Seguridad de las Catedrales tenía por objeto servir de base para la realización de un análisis global de los riesgos, y determinar si el edificio presentaba un nivel aceptable de seguridad para la protección del patrimonio.

El primer tema se refiere a la limitación de los riesgos de inicio de un incendio, con especial atención a las instalaciones eléctricas y a los sitios de construcción, ya que éstas son las dos causas principales del fuego en los monumentos históricos en Francia (la calidad de las instalaciones eléctricas y el seguimiento de los trabajos, sobre todo de los trabajos por punto caliente).

El segundo tema se refiere a los riesgos de desarrollo y propagación del fuego con la implantación, por ejemplo, de sistemas automáticos de detección para mejorar la respuesta en caso de incendio, o de superposición de grandes volúmenes, cuando sea posible.

El tercer tema tiene por objeto facilitar la intervención de los servicios de bomberos y socorro.

A menudo las catedrales, como muchos edificios antiguos emblemáticos, tienen alturas importantes, con la parte más peligrosa al nivel de la cubierta, lo cual dificulta la intervención en un ambiente urbano a menudo denso. Cuando se realizó la intervención para Notre Dame, por ejemplo, la Brigada de Bomberos de París no disponía de brazos elevadores lo suficientemente altos, para atacar el tejado de la manera más eficaz posible. Los brazos elevadores de los que disponían, estaban adaptados al tejido urbano parisino, a la anchura de sus calles y a sus características. En Francia, el reglamento de seguridad establece, para las vías destinadas a acoger escaleras de bomberos, una fuerza portante para vehículos de 16 toneladas y una resistencia al punzonado para el lugar donde se van a posicionar los estabilizadores de las escaleras. Para el incendio de la catedral parisina, los levantadores llegaron de todas partes de Francia. Algunos pesaban 27 toneladas, por lo que en el momento de utilizarlos hubo mucha preocupación sobre el comportamiento de la red vial. Sobre todo porque entonces, la ciudad de París no se comprometía con la fuerza portante de los espacios que rodeaban a Notre Dame. La operación demostró que estos espacios podían soportar máquinas de una masa muy superior a la reglamentaria.

Las demás temáticas se refieren a facilitar la acción de socorro público, las relaciones entre los responsables de los establecimientos y estos servicios, el encuadramiento de las condiciones de explotación de las catedrales, la realización de planes de salvaguardia de los bienes culturales, la formación de los agentes y el establecimiento de medidas organizativas.

Y para cada uno de estos ocho temas, hay acciones que se proponen. Para el primero, por ejemplo, se proponen 14 acciones: nueve se encontraban en la primera versión del plan y cinco se añadieron en 2023.

Entre las que se han añadido, podemos citar la prohibición de mantener velas encendidas fuera de la presencia del público o de personas dentro del edificio, porque hay muchas iglesias o catedrales donde, incluso cuando el edificio estaba cerrado, las velas y los cirios seguían ardiendo, esto llevó a conatos de fuego.

También se suprimieron las instalaciones eléctricas, en particular de iluminación, que eran independientes del edificio. Se había observado que en algunas catedrales, los ayuntamientos o las ciudades habían propuesto realizar iluminación exterior, pero llegaban hasta las fachadas de los edificios. Sin embargo, estas instalaciones eléctricas eran independientes de las del edificio y, a menudo, no cumplían con los requisitos reglamentarios aplicables a estos inmuebles.

También se pidió retirar las antenas que no pertenecían al Estado y no se utilizaban en el edificio, como las de telefonía y las de la policía u otros servicios. Además de solicitar que se evite colocarlas en las catedrales, sino en lugares más adecuados.

Y para cada una de estas acciones, el plan incluye una pequeña ficha que precisa quién es el encargado dentro de la administración, cuáles son los actores que pueden estar asociados a él y cuál es la periodicidad del control, todo acompañado de comentarios.

Luego de cinco años de aplicación del Plan de Seguridad de las Catedrales en toda Francia, la situación es la siguiente:

- En 2020: 17 catedrales tenían un nivel de seguridad insuficiente, incluso en relación con los requisitos reglamentarios actuales, 58 edificios cumplían los requisitos del texto, 14 tenían el nivel deseado por el Estado y ninguno tenía un nivel realmente muy superior; sólo se habían realizado 13 planes de salvaguardia de los bienes culturales.
- En febrero de 2025: sólo hay cuatro catedrales que tienen un nivel de seguridad insuficiente, las cuales son objeto de un seguimiento muy particular por parte del Ministerio, pero también por los servicios de bomberos locales de las zonas afectadas, con el fin de mejorar el nivel de seguridad y alcanzar al mínimo el nivel reglamentario. También, 20 catedrales ahora tienen el nivel de referencia, lo que es notable en tan sólo cinco años, teniendo en cuenta los costes de este nivel de mejora en la seguridad de edificios y los plazos necesarios para llevar a cabo las obras.
- Asimismo, se han realizado 80 planes de salvaguardia de los bienes culturales, esto significa que en cinco años se logró la elaboración de 67 planes de salvaguardia adicionales.
- A lo anterior se agregan 57 catedrales auditadas exhaustivamente en materia de seguridad contra incendios, mientras que el Ministerio también promueve la creación de servicios de gestión de proyectos. Se trata de empresas especializadas en el acompañamiento de las obras y de los esquemas directores; así, en la actualidad, 29 catedrales están acompañadas por asistentes a la dirección de obra.

De esta manera, se ha tomado en cuenta la problemática de la protección del patrimonio, además de comprometerse muchos medios a nivel nacional y local.

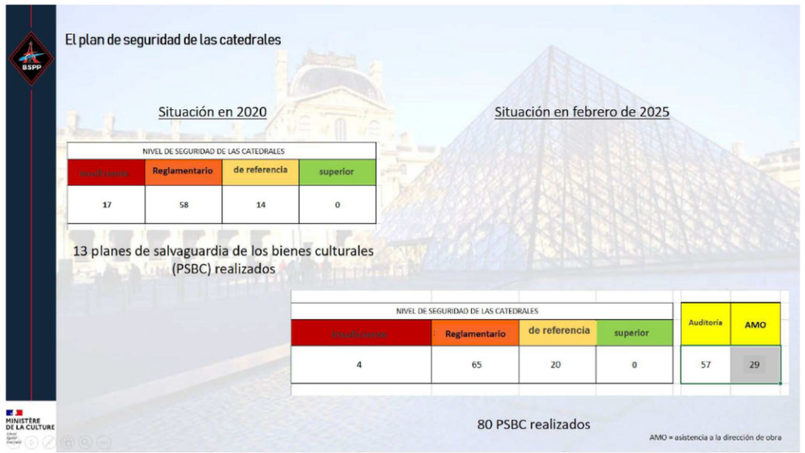


Figura 2. El Plan de Seguridad de las Catedrales. Fuente: Elaboración propia.

Los próximos pasos y los principales temas de debate para el año en curso son los siguientes:

El primero de estos temas se refiere a las modalidades de aplicación del Plan de Seguridad de las Catedrales a nivel nacional en Francia. El plan pretendía ser una ayuda a la reflexión, una guía al análisis de riesgos, y resulta que en algunas partes de Francia ha sido tomado por un texto reglamentario, o bien, hoy en día es considerado por algunas instancias locales como un texto que conviene aplicar al pie de la letra. Éste no era el espíritu del texto y, sobre todo, querer aplicar todo al pie de la letra es extremadamente restrictivo y acarrearía costes de trabajos muy importantes. Por tanto, el Ministerio de Cultura trabaja en este tema de aplicación del texto y armonización para su aplicación a nivel nacional. Por otra parte, este documento, que inicialmente sólo interesaba a las catedrales del Estado, sirve de base para el análisis de otros edificios patrimoniales pertenecientes a ayuntamientos o particulares.

El segundo tema de actualidad es el mantenimiento y la explotación de las instalaciones técnicas. Entre las instalaciones que se han puesto en marcha para Notre Dame se encuentran sistemas de niebla de agua a nivel de la estructura, de manera que puedan tener una acción lo más temprana posible, cuando se inicie un incendio. Estas instalaciones deberán ser mantenidas y explotadas satisfactoriamente. Cabe señalar que hubo una activación intempestiva de la niebla de agua por problemas eléctricos, pocos días después de la reapertura de Notre Dame. No se habló mucho de ello, pero ha tenido consecuencias. Afortunadamente, la presencia del agente de seguridad contra incendios H24, permitió limitar la cantidad de agua derramada y, por tanto, limitar los efectos indeseables del disparo intempestivo del sistema de extinción automática. Debido a ese incidente, se concluyó que la implementación de un sistema de este tipo no es necesariamente adecuado para todas las catedrales y que, en un sitio sin una vigilancia H24, la aplicación del sistema de extinción durante varias horas, podría crear más daños que el propio fuego.

Otro tema importante en Francia, es la obligación de presencia humana permanente durante las horas de apertura al público. Se trata de una obligación reglamentaria en todos los establecimientos que reciben visitantes; además, se ha comprobado que en muchos templos, el edificio está abierto durante el día para la práctica libre del culto y, con frecuencia, no hay personal presente para dar la bienvenida al público.

El último tema de la responsabilidad del Ministerio de Cultura es desarrollar las asistencias a la dirección de obra en todo el país, de modo que en dos o tres años todas las catedrales de Francia cuenten con ayudantes de dirección de obra, capaces de acompañarlas en todos los trabajos y lograr que la seguridad alcance el nivel deseado por el gobierno.

En conclusión, el Plan de Seguridad de las Catedrales es un documento de ayuda para el análisis de riesgos, que viene a complementar el arsenal reglamentario francés para cubrir el espectro de la protección del patrimonio cultural. Después de cinco años de implementación, está dando frutos y ha generado una dinámica nacional para la protección del patrimonio.

*Fotografías/*slides*/gráficas tomadas de presentación compartida para el Encuentro por parte de Jean-François Duarte-Paixao.

Tecnologías recientes en la Gerencia de Proyectos de Conservación del Patrimonio

Ing. Oscar Solís Yépez

Muchas gracias por la invitación.

Vamos a platicar hoy sobre lo que es la Gerencia de Proyectos. La conservación del patrimonio histórico involucra a esta especialidad, ya que desde la antigüedad estuvo presente la organización de los recursos, tanto materiales como humanos, en la construcción y posteriormente en la conservación de este patrimonio.

En la antigüedad, desde las pirámides de Egipto y la gran muralla china, la Gerencia de Proyectos no se denominaba así, sin embargo ya existía un plan para llevar a cabo esas grandes obras emblemáticas y, eventualmente, a lo largo del tiempo lograr su conservación.

Algunas organizaciones como el Project Management Institute (PMI), una de las más prestigiadas a nivel internacional, se dedica a analizar los diferentes comportamientos de los proyectos en varias partes del mundo, encontrando que la mayor parte fracasa en un 37 por ciento, porque el objetivo de la organización no va en paralelo con el objetivo del proyecto. Éste es uno de los grandes problemas que tienen hoy en día los proyectos en el mundo, sin importar de cuál se trate.

PMI Pulse of Profession 2021	Global	Construcción	Norteamérica	China	Europa	Latinoamérica
Proyectos que alcanzan sus objetivos e intención de negocio	73%	74%	75%	69%	70%	71%
Proyectos concluidos en tiempo	55%	57%	58%	58%	50%	53%
Proyectos completados dentro de presupuesto	62%	60%	63%	63%	57%	63%
Proyectos con cambios al alcance no controlados	34%	30%	33%	33%	32%	27%
Fueron considerados fallidos	12%	12%	14%	14%	12%	15%
Proyectos fallidos, pérdidas en presupuesto	35%	34%	32%	32%	40%	32%
Porcentaje desperdiciado por cada dólar americano (2020)	11.4%	12.7%	12.3%	9.7%	13.1%	12.5%
Causa principal de falla en los proyectos (más mencionada 2020)	37% Cambios en las prioridades de la organización	37% Mala planeación inicial	41% Cambios en las prioridades de la organización	31% Cambio en los objetivos del proyecto	41% Cambios en las prioridades de la organización	40% Cambios en las prioridades de la organización

Fuente: PMI

Figura 1. Pulso de profesiones 2021 por Project Management Institute (PMI). Fuente: Elaboración propia a partir de presentaciones de la Cámara Nacional de Empresas de Consultoría (CNEC).

Las pérdidas económicas por estas fallas representan más del 11 por ciento del presupuesto original.

Afortunadamente, en la actualidad se cuenta con elementos tecnológicos que nos ayudan a agilizar no sólo la toma de decisiones, sino también disponer de información

al día y al momento para disminuir estos riesgos para, finalmente, consolidar un proyecto exitoso.

Una de estas herramientas que voy a mostrar es el BIM (Building Information Modeling) o Modelado de Información de Construcción, es una metodología que muchas personas confunden con un *software*. El BIM es una metodología de trabajo colaborativo, con la cual se busca que todos los interesados y participantes en un proyecto, tengan la misma información para evitar confusiones en el intercambio y actualización de la misma, con el objetivo de tener un control preciso de lo que es el diseño, el alcance, el costo y, eventualmente, el tiempo.

Por otra parte, tenemos también los levantamientos de alta definición realizados a través de drones y escáneres. Esta herramienta nos permite contar con el levantamiento de la edificación ya concluida, para su posterior mantenimiento o llevar a cabo alguna modificación, ampliación o renovación. Con esta tecnología se logra obtener un mapa que nos lleva a una nube de puntos, la cual se transmite al modelo y permite comparar las desviaciones que podrían existir en cuanto a asentamientos y movimientos.

Las plataformas digitales consisten en otra herramienta, cuyo uso se hizo intensivo durante el tiempo de la pandemia. Con este sistema se busca concentrar toda la información a través de una nube y, probablemente, de un servidor virtual, donde se tenga toda la información a la mano para todos los participantes del proyecto, de manera inmediata.

Asimismo, el llamado Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) son sensores que se utilizan en diferentes dispositivos, así como en maquinaria, en personal, en controles de acceso, en monitoreo, de asentamientos, en el comportamiento de las edificaciones, etc. Con esta información que se va registrando, se pueden tomar decisiones para determinar las actividades y obras que se pueden llevar a cabo al momento, como en el caso de la conservación del patrimonio.

Tenemos también la ya tan llevada y traída Inteligencia Artificial (IA) que, en estos casos, con la conjunción de las herramientas mencionadas anteriormente, podemos tener el modelo con toda la información, tanto de la fase de diseño, como de la fase de construcción. De esta manera, con los monitoreos que se hagan, tomar algunas medidas y condiciones sobre las cuales está en uso esa edificación o monumento y, eventualmente, llevar a cabo las acciones necesarias para su conservación.

En cuanto a metodologías, no sólo la parte tecnológica ha evolucionado en esta especialidad, sino también la forma en que se gestiona.

En la Gerencia de Proyectos hemos trabajado a través de metodologías, predictivas o en cascada, lo que significa que no podemos pasar de un proceso a otro si no se ha concluido la fase anterior.

Hoy, tomado de otras especialidades, como es el tema de la manufactura o la tecnología de la información (TI), tenemos metodologías como el Scrum, que significa gestionar un proyecto trabajando de forma ágil, en una labor colaborativa entre el patrocinador y las personas especializadas en dicho proyecto, en el cual se hacen entregas de valor por lo menos de cuatro a seis semanas. Esto se va validando entre todo el equipo. Con esta participación activa se logran resultados más ágiles y frecuentes.



Figura 2. Metodologías Scrum. Fuente: Elaboración propia a partir de presentaciones de la CNEC (2025).

También recurre a la metodología Kanban, que prácticamente obedece a un tema de difusión de información en el cual, mediante un tablero Kanban, se monitorea el trabajo desde el inicio y cómo avanza. La intención es llevarlo hasta la fase final sin que ninguna de las fases se sobrecargue de trabajo y después de haber pasado por el proceso.

Finalmente, del proceso de manufactura adaptamos los principios Lean, con los cuales se busca una entrega de valor recurrente con cero desperdicios. Estos principios ayudan a utilizar de manera eficiente los recursos y que la probabilidad de fracaso en los proyectos sea mínima, para una entrega de valor.

Métodos de entrega de proyectos

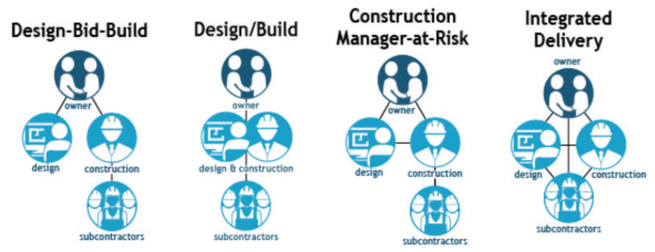


Figura 3. Métodos de entrega de proyectos. Fuente: Elaboración propia a partir de presentaciones de la CNEC (2025).

Los métodos de entrega de proyectos han evolucionado con el tiempo. La manera tradicional, como se manejaba hace muchos años, era que una organización hacía el diseño, después se realizaba un concurso para su ejecución y, finalmente, entregar el proyecto a uno a varios contratistas.

Esto ha evolucionado hacia lo que hoy se denomina Entrega Integrada de Proyectos, en donde se arma un compromiso de acuerdos entre el patrocinador del proyecto, los diseñadores, los especialistas en conservación del patrimonio cultural, las gerencias de proyecto y las empresas que van a participar, para realizar un compromiso colectivo, tanto en la parte del alcance como en el presupuesto y el tiempo. Todos tienen la

obligación de colaborar para conseguir esas metas, más allá de lo que pudieran ser los resultados y parámetros medibles, como son el tiempo, el costo y la calidad; así como lograr la satisfacción de los interesados a través de un equilibrio entre el gasto y el esfuerzo empleado, contra la satisfacción y funcionalidad de lo que se obtuvo a la conclusión del proyecto. Esto es responsabilidad de todos. Aquí se hace a un lado el carácter individual de las personas y organizaciones, todos tienen como compromiso el logro de las metas. Si alguien del grupo falla, es que todo el grupo falló. Es una metodología que eventualmente ha funcionado en otras partes del mundo, en México apenas se está implementando.

Esto va vinculado con algo que se llama contratos colaborativos, los cuales vinculan las métricas de éxito que se establecen en el acuerdo entre las agrupaciones participantes, con los beneficios que se obtienen de manera colectiva, no individual. Esto, eventualmente reduce la probabilidad de sobrecostos y retrasos en la ejecución de los trabajos. Con esto, se han obtenido métricas donde se muestra un aumento en la productividad de los proyectos, en comparación con otros métodos de trabajo y otros esquemas de contratación, algo muy importante en la eficiencia de los proyectos.

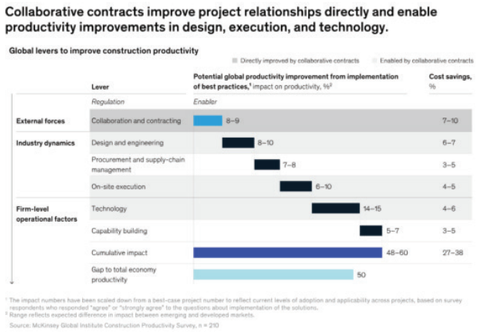


Figura 4. Contratos colaborativos y sus relaciones con la productividad de los proyectos. Elaboración propia a partir de presentaciones de la CNEC (2025).



Figura 5. Contratos colaborativos. Elaboración propia a partir de presentaciones de la CNEC (2025).

En la parte de sustentabilidad, no podemos dejar al lado lo que sucede con la conservación del patrimonio histórico y cultural. Organizaciones como el Internacional Living Future Institute o la certificación LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)

trabajan para la conservación del patrimonio. Estas certificaciones sustentables van más allá de coadyuvar a que el patrimonio cultural e histórico permanezca y trascienda, también laboran en pro de las condiciones climáticas que hoy tenemos y, de alguna manera, promueven la consolidación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

Parte de lo que se trata de incorporar ahora en estos proyectos del patrimonio cultural e histórico, es el uso de energías renovables, como es el caso de las energías fotovoltaica y eólica, las cuales tienen un alto potencial que, probablemente, se puedan utilizar en la conservación del patrimonio.

En la actualidad se tiene la meta de descarbonización, la cual todavía estamos muy lejos de alcanzar. El corte que hizo la ONU en 2022, sobre un índice de descarbonización, muestra que estamos muy lejos de la meta prevista para 2030 y al índice 0 para 2050. Esto debe cambiar con la implementación de metodologías y herramientas sustentables. En el mundo, muy pocos países incluyen en sus reglamentos el tema de la sustentabilidad, lo cual se refleja en el atraso para alcanzar las metas de descarbonización 0 hacia 2050.

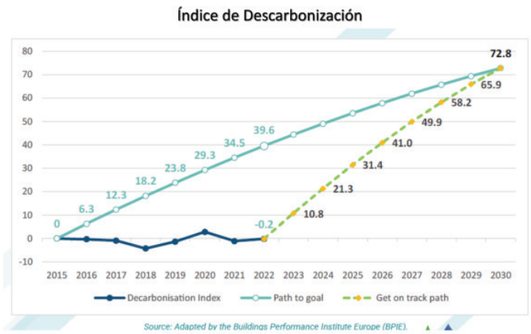


Figura 6. Índice de descarbonización. Elaboración propia a partir de presentaciones de la CNEC (2025).

La parte de riesgos es muy importante, como lo presentó uno de los expositores anteriormente. Al estar sujetos a las condicionantes de la gente, del clima, del desarrollo urbano en donde se lleva a cabo toda esa actividad, los proyectos requieren que los análisis de riesgos sean exhaustivos.

Actualmente tenemos la facilidad, cada vez mayor, de las herramientas tecnológicas y digitales. Se pueden hacer simulaciones, las cuales permiten categorizar los riesgos, tanto cualitativa como cuantitativamente, y en función de ello, armar las matrices de riesgo para atender básicamente los de mayor impacto y una alta probabilidad de ocurrencia.

El cambio climático está afectando la conservación del patrimonio histórico y cultural de los países; por lo tanto, en los proyectos se deben tomar medidas para mitigar o reducir este impacto, que podría afectarlos de manera agresiva.

La participación en esta resiliencia, para conservar y hacer frente a este cambio climático y a la afectación de los proyectos de conservación, definitivamente implica el compromiso del gobierno, del sector privado, de la sociedad, y de todos en conjunto, para que esto funcione como un sistema y no se consideren proyectos aislados.



Figura 7. Principios para una infraestructura resiliente. Elaboración propia a partir de presentaciones de la CNEC (2025).

La parte del financiamiento es algo muy importante. Sabemos que los recursos son escasos, especialmente en las entidades gubernamentales, y la idea de financiar estos proyectos ha evolucionado a través del tiempo. En la actualidad se cuenta con la participación privada bajo diferentes esquemas, también se ha generado un *crowdfunding*, o financiación colectiva, en diferentes modalidades, desde una donación hasta la retribución en especie a las personas que aportan fondos para la conservación del patrimonio cultural histórico. De esta forma, se abre el abanico de posibilidades para tener los recursos económicos que se requieren para la conservación.

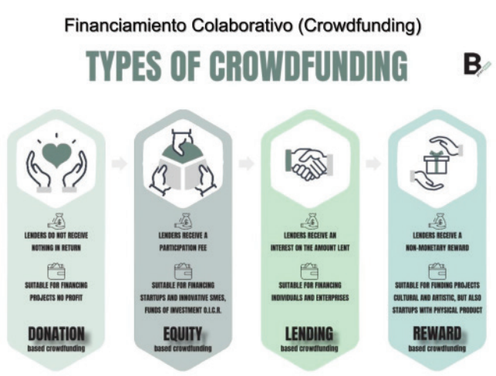


Figura 8. Financiamiento colaborativo (*Crowdfunding*). Elaboración propia a partir de presentaciones de la CNEC (2025).

Por otra parte, con respecto a la profesión, hay una estadística que el PMI marca y va de la mano con la curva poblacional. Se estima que para 2030, se van a necesitar 25 millones de gerentes de proyecto para atender la demanda. Hoy el PMI tiene certificados a 1.6 millones de gerentes de proyecto, pero aquí hay algo interesante: el cambio generacional. Se necesitan 12 millones de nuevos profesionales en Gerencia de Proyectos, porque ya muchos están en el proceso de retiro, por lo cual hay que hacer un reemplazo rápido y ordenado de ese cambio generacional. En consecuencia, necesitamos desa-

rrollar ese talento de una manera precisa, a través de mentorías y de acompañamiento, a fin de que este déficit no nos alcance en años posteriores.

Las habilidades que estas nuevas generaciones necesitan tener como gerentes de proyecto, como líderes y encargados de los equipos, así como las organizaciones que participan en los proyectos de conservación, se refieren básicamente a lo que conocemos como habilidades blandas, llamadas también *power skills*, que están vinculadas a la comunicación, la solución de problemas, al liderazgo colaborativo y a la parte del pensamiento crítico.

Ahora, me refiero al tema de la Catedral de Notre Dame. Es un ejemplo que viene muy de la mano. La reconstrucción de Notre Dame, a raíz del incendio ocurrido en 2019, tuvo una participación importante de un área de Gerencia de Proyectos. Tenemos, por una parte, la autoridad encargada de regular toda la parte de monumentos y edificios históricos de Francia; por otra, se creó la autoridad contratante, responsable de hacer la recaudación para la reconstrucción de la catedral, que alcanzó la suma de aproximadamente 700 millones de euros. Esta organización se encargó de los contratos con cada una de las empresas y organizaciones que participaron en el proyecto. Esta autoridad estaba asistida por una asesoría de Gerencia de Proyectos, con la participación de la diócesis de París, misma que estableció los parámetros a considerar para el mobiliario destinado a atender a los feligreses. Se tuvo la participación de una dirección de obra y de todas las empresas que colaboraron, tanto en la parte artesanal como en la parte industrial.

El equipo de líderes de la catedral y del proyecto fue de aproximadamente 30 personas en la dirección de proyecto, sin contar a toda la gente que participó en los diferentes frentes de trabajo.

La reconstrucción de Notre Dame es un ejemplo de todo lo que se tuvo que hacer en la gestión de los recursos, tanto materiales como financieros y humanos, algo muy importante en la Gerencia de Proyectos, como la parte del suministro de la madera para habilitar toda la armadura que había sido afectada en la catedral.

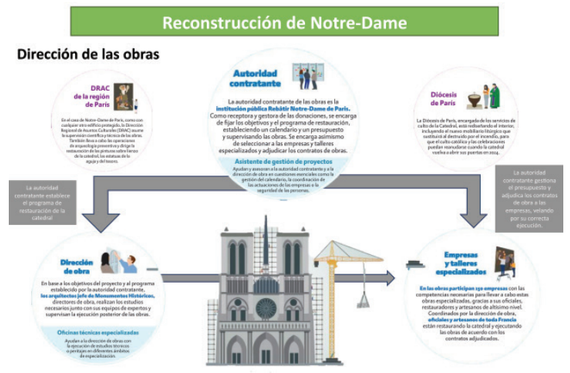


Figura 9. Reconstrucción de Notre Dame. Elaboración propia a partir de presentaciones de la CNEC (2025).

La participación de todas las especialidades, cada uno trabajando, en forma local o en talleres, para llegar y montar los elementos que se estaban reconstruyendo. El apoyo técnico y científico de diversas organizaciones para realizar los trabajos de manera adecuada.

En conclusión: puedo decirles que la tecnología y las metodologías de gestión de proyectos ya no son algo opcional, sino algo que debemos tomar hoy. No es algo de moda, sino la manera de hacer mejor las cosas. La sostenibilidad es una responsabilidad de todos los que estamos involucrados en la obligación de llevar un proyecto a buen puerto.

En cuanto a la gestión de riesgos, siempre se deben tomar en cuenta y ser flexibles ante situaciones extraordinarias, como en el caso de una pandemia que nadie previó lo que iba a ocurrir; no obstante, se debe contar con un plan de acción ante una situación de crisis que, probablemente, no sepamos de qué se trata y saber cómo actuar en determinado momento.

Asimismo, una comunicación ágil, oportuna y precisa a través de todas estas herramientas de trabajo colaborativo que existen hoy, invirtiendo en plataformas para el manejo de la información y el desarrollo profesional.

En cuanto a la competitividad, el desarrollo de talento es fundamental para tener equipos de proyectos autodirigidos, innovadores y con mejores prácticas en la parte de riesgo, seguridad y planificación.

Una frase final. No depende nada más de que cumplamos las métricas de costo, tiempo y calidad, que es el triángulo común de lo que nosotros, como gerentes de proyecto, hemos aprendido a lo largo del tiempo, sino también aprender a mejorar y a innovar día con día; y más allá de eso, no nada más ver por las métricas como un resultado exitoso de un proyecto, sino que el balance entre el gasto y el esfuerzo vaya de la mano con la aceptación de los interesados en la parte de la funcionalidad, para que realmente valgan la pena el gasto y el esfuerzo empleados en el proyecto.

Es todo de mi parte.

Muchas gracias.

*Fotografías/*slides*/gráficas tomadas de presentación compartida para el Encuentro por parte de Oscar Solís Yépez.

Actualización de tecnología de obras históricas

Ing. Francisco Ramos Kuri

Pilotes de Control, SA, es una empresa con 75 años de experiencia, fundada por el ingeniero Manuel González Flores, quien inventó este sistema de cimentación para corregir el mal comportamiento que presentan edificios construidos en suelos altamente compresibles, con poca capacidad de resistencia.

En su ponencia de ayer, el doctor Gabriel Auvinet expuso los retos de la ingeniería mexicana debido a las características del suelo de la Ciudad de México, que se resumen básicamente en dos.

La primera es que el suelo de la Ciudad de México está compuesto por arcillas con alto contenido de agua altamente compresible, con poca capacidad de resistencia, por lo que su consistencia es blanda.

La segunda es el hundimiento que se presenta constantemente, debido a la extracción de agua del subsuelo.

En respuesta a lo anterior, a principios de los años cincuenta del siglo XX, el ingeniero González Flores inventó un sistema de cimentación que, además de transmitir el peso de un edificio al suelo, lo endereza, controla movimientos y permite que descienda conforme se hunde la ciudad.

El tema de hoy explica el refuerzo de la cimentación original del templo de Capuchinas, su recimentación con 160 pilotes y el renivelado, trabajos realizados entre 1974 y 1978.



Imagen 1. Vista del templo de Capuchinas. Crédito: Pilotes de Control, SA. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uR-ZXO0?si=kqM7QeLQjKsV4dJB&t=10083*

En la imagen aparecen las fachadas de dos templos coloniales, a la izquierda está la antigua Basílica de Nuestra Señora de Guadalupe, a la derecha el templo de Capuchinas que data de 1787, fue diseñada y construida por el arquitecto Ignacio Castera. Es de medianas dimensiones, está formado por cuatro cuerpos al poniente, o a la izquierda, del cuerpo central y hasta hace algunos años, también había cuatro cuerpos al este, ahora sólo tiene dos.

En una litografía de la época colonial se ve simétrico el templo de Capuchinas.



Imagen 2. Litografía del templo de Capuchinas. Reproducción de fotografía: Pilotes de Control, SA. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=wMLXURMzGbogAfZn&t=10208*

Cabe recordar que en la época prehispánica, la ciudad de Tenochtitlan estaba rodeada por varios lagos, siendo el de Texcoco el más extenso. Inicialmente hubo varios asentamientos en la región, en particular el de los mexicas, quienes se establecieron en una isla al centro del lago de Texcoco. Conforme creció la población, le fueron ganando terreno al lago y posterior a la conquista, los españoles fundaron la Ciudad de México y continuó creciendo sobre el lago, al grado que en la actualidad ocupa la mayor parte de la superficie.

El conjunto de la Basílica de Guadalupe se encuentra al norte de la Ciudad de México, muy cercano al cerro del Tepeyac. Está compuesto principalmente por tres edificios, la basílica nueva construida entre 1973 y 1974, la basílica antigua y el templo de Capuchinas.

El templo de Capuchinas tenía una composición arquitectónica simétrica, pero los dos cuerpos al extremo oriente se demolieron después de 1954, debido a los daños ocasionados por el hundimiento diferencial del suelo.



Imagen 3. Vista aérea del templo de Capuchinas en 1954. Crédito: Pilotes de Control, SA. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=309OYfLOLoHKnHbH&t=10259*

Para 1974 el desnivel del templo era de 3.47 metros con respecto a la esquina norponiente, por lo que el arquitecto Pedro Ramírez Vázquez le solicitó al ingeniero Manuel González Flores, renivelarlo. Pensó originalmente en hacer descender la parte que estaba más alta, sin embargo, para que el templo estuviera al nivel del atrio, se tomó la decisión de elevar la zona oriente.



Imagen 4. Vista del templo de Capuchinas con hundimiento visible con respecto al nivel del atrio (3.472 m). Crédito: Pilotes de Control, SA. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=7zlSO4s7ktiP_4Zx&t=10268*

Se formó un grupo multidisciplinario liderado por el ingeniero Manuel González, que analizó las condiciones de seguridad estructural del edificio de mampostería, su comportamiento a través del tiempo, las características geotécnicas del sitio, la influencia entre los cuerpos colindantes y el templo, así como la diferencia de niveles entre ellos y el atrio, etcétera.

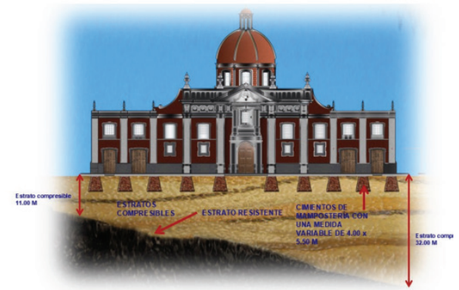


Figura 1. Diagrama de estratos y cimientos. Fuente: Pilotes de Control, SA.

El origen del problema se debe a un asentamiento desigual de la cimentación del templo, por lo que se analizó el hundimiento diferencial del suelo, se definieron sus características geotécnicas con una costra superficial, un estrato compresible compuesto principalmente de arcilla con alto contenido de agua, encontrando la roca basáltica del cerro al lado poniente, a una profundidad de 11 metros. La inclinación del talud de roca es muy pronunciada, por lo que del lado oriente (el lado derecho de la imagen) se registraron 32 metros de profundidad al primer estrato resistente. El estrato compresible es, por lo mismo, menor al poniente y mayor al lado oriente del templo.

Se hicieron los estudios topográficos de precisión milimétrica que determinaron los 3.47 metros de desnivel, así como del lado oriente, el que más se hundió, y se encontró que estaba por debajo del nivel del atrio.

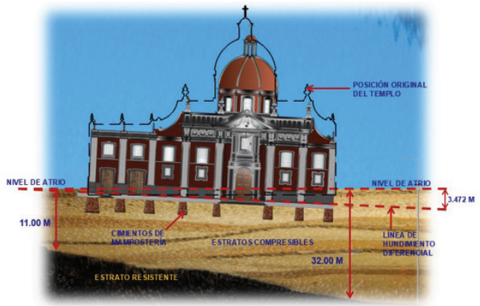


Figura 2. Diagrama de cimientos y línea de hundimiento diferencial. Fuente: Pilotes de Control, SA.

La estructura original estaba resuelta mediante muros, zapatas, bóvedas y cúpula central de mampostería, la cimentación estaba formada por una retícula de zapatas corridas, también de mampostería, de 4 metros de base por 5.50 de altura.

El peso total del templo es de 12 mil 560 toneladas.

La primera etapa consistió en el reforzamiento estructural de la cimentación. El objetivo: rigidizar la cimentación, la cual se basó en encofrar las zapatas de mampostería con unas trabes de concreto armado, distribuyendo 160 dados estructurales, por los cuales se hincaron pilotes en igual número, suficientes para sustentar totalmente el inmueble.

Los trabajos consistieron en excavar lumbreras y túneles por debajo del templo, encofrar las zapatas con concreto armado, rigidizando la cimentación.

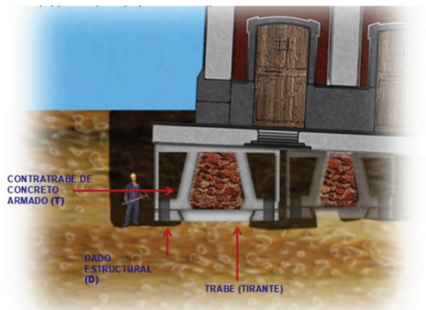


Figura 3. Diagrama de contratrabe de concreto armado. Fuente: Pilotes de Control, SA.

La segunda etapa consistió en el hincado de los pilotes. Se hincaron los 160 pilotes apoyados en un estrato firme, los ubicados al poniente en el talud de roca, y los que están al oriente sobre el primer estrato firme.

El sistema constructivo de los pilotes fue también invento del ingeniero Manuel González Flores y lo denominó "pilotes descolgados": se hizo una perforación previa con un diámetro mayor al del pilote, en el primer tramo se echó un precolado de concreto

como si fuera la punta de un lápiz (cilíndrico con punta cónica), en tanto que del lado opuesto de la punta se realizó un armado con varillas, se colocó una cimbra plástica y se coló en sitio. Posteriormente se hizo descender el pilote por una perforación en la losa de desplante y se traslapó con otro armado de acero de 2 metros de largo, descolgando este segundo tramo previamente colado. La operación se repitió hasta que se alcanzó la profundidad requerida: 11 metros de profundidad en los pilotes de la zona poniente y hasta 32 metros los pilotes de la zona oriente.

Para que los pilotes fueran monolíticos, se determinó que entre colado y colado no podían transcurrir más de 15 minutos.

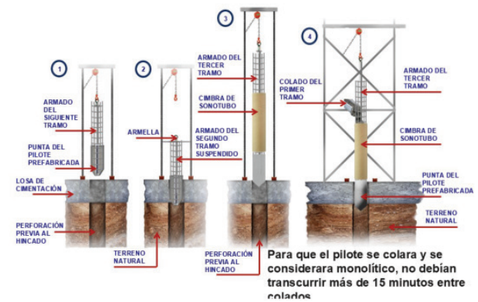


Figura 4. Diagrama de proceso de colado de pilotes. Fuente: Pilotes de Control, SA.

En la tercera etapa se preparó el edificio para renivelarlo y elevarlo. La nueva cimentación estaba firme, rígida, contaba con una nueva retícula de contratrabes de concreto y eso ayudaba mucho para poder elevar el monumento. Para preparar el edificio se colocaron tensores en la superestructura, que cruzaban de lado a lado, en sentido longitudinal y transversal; por la parte exterior de los muros se colocaron vigas de acero, de tal manera que se pudiera rigidizar la estructura y que durante el renivelado y elevación del templo, los muros de mampostería no se dañaran. En la imagen se pueden ver algunos ejemplos de los tensores y las vigas que se pusieron.

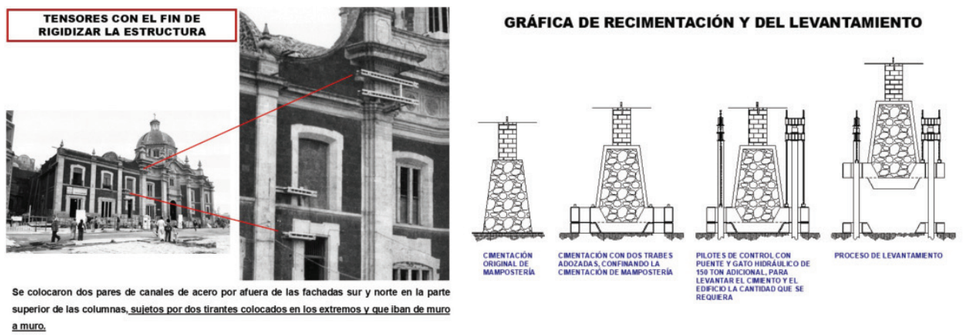


Figura 5. Tensores con el fin de rigidizar la estructura y gráfica de recimentación y del levantamiento. Fuente: Pilotes de Control, SA. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=vlgJNneBHXUZD18e&t=10296*

Cuarta etapa: renivelado. Se colocaron gatos hidráulicos con capacidad para 150 toneladas en cada uno de los 160 pilotes, se capacitó a un operario por cada pilote para realizar el renivelado en forma proporcional y con indicaciones precisas.

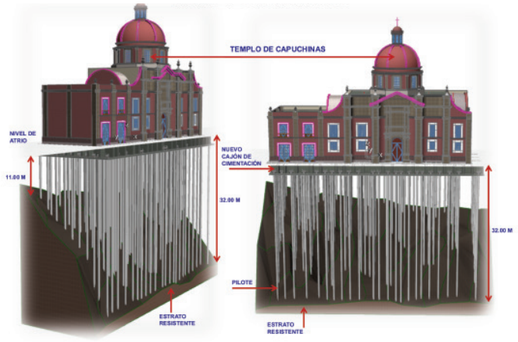


Figura 6. Corte esquemático. Fuente: Pilotes de Control, SA.

En una fotografía original de 1978 sin retocar, se ve un pilote con un gato hidráulico que refleja el equipo que se tenía en ese momento.



Imagen 5. El templo de Capuchinas renivelado, octubre de 1978. Crédito: Pilotes de Control, SA. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=VoocVLaSfgNDmLN2&t=10818*

El templo se fue renivelando poco a poco, al terminar la recuperación del nivel, inició otra actividad para elevar 50 centímetros todo el templo y así dejar el acceso a la altura del atrio.

El procedimiento de renivelado fue el siguiente: se acciona el gato hidráulico, el émbolo eleva el marco de carga superior y también se asciende el templo en ese punto. Las tuercas del cabezal inferior suben junto con los husillos, que se hacen descender hasta que tengan nuevamente contacto con el cabezal inferior.

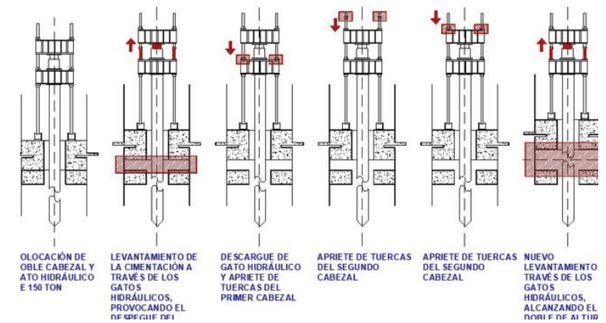


Figura 7. Maniobras para el levantamiento. Fuente: Pilotes de Control, SA.

Los movimientos fueron milimétricos, al día se subían como máximo 8 milímetros, y así sucesivamente. Se utilizaron sistemas de monitoreo topográfico e inspecciones técnicas diarias.

En esta imagen se ve el templo nivelado. Lo que aparece a la derecha es una regla, que se usó inicialmente con un segundo tramo de la regla que estaba fija al piso del atrio, y la diferencia que se aprecia entre ambas es la distancia que se elevó el edificio: 3.5 metros.



Imagen 6. Vista de la esquina en donde se colocaron reglas y el estadal como escala métrica, para el monitoreo de los movimientos. Crédito: Pilotes de Control, SA. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=HlsATfwwOKR-kTKSV&t=10786*

La siguiente fotografía refleja cómo al ir elevando el templo, éste se despegó del suelo y creó un espacio que se dejó como un nuevo sótano.

En esta otra fotografía se ven las varillas horizontales de las nuevas trabes inferiores a la base de las zapatas, que posteriormente permitieron armar y construir la nueva losa de desplante de la cimentación.



Imagen 7. Vista del sótano del templo, que se formó por el levantamiento del inmueble. Capuchinas. Crédito: Pilotes de Control, SA. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=Pul3tWfW4P0G7mWH&t=10860*

Así es como está hoy el templo de Capuchinas totalmente renovado. Esta fotografía es de inicios del año 2025.



Imagen 8. Posición actual del templo de Capuchinas. Crédito: Pilotes de Control, SA. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=QTpzNRWuHhPCcbjZ&t=10890*

*Fotografías/*slides*/gráficas tomadas de presentación compartida para el Encuentro por parte de Francisco Ramos Kuri / Pilotes de Control, SA.

Mesa 7
Innovación y uso de tecnología en la divulgación del patrimonio cultural







Moderadora: **Mtra. Teresa Menchelli Pérez**
Coordinadora del área de Comunicación Educativa del Museo de la Fotografía del Sistema Nacional de Fototecas (SINAFO) del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH)

Secretario: **Ing. Roberto Aguerrebere Salido**
Miembro fundador de la Asociación Alumni México Francia y Consejero del I Consejo Directivo

Para mayor detalle escanea el código QR y podrás ver la transmisión completa de esta sección del Encuentro México y Francia

Crédito: CICM-imagen en evento. Esta página





Reconstrucción 3D y su impacto en la renovación museográfica: El caso de La Quemada, Zacatecas

Dr. Manuel Dueñas García (Participación virtual)
Doctor en Arqueología y especialista en patrimonio digital







Diez años digitalizando la ciudad prehispánica de Tzintzuntzan, México. Investigación y conservación, una propuesta de divulgación

Dr. José Luis Punzo Díaz (Participación virtual)
Dr. Alfonso Gastélum Strozzi
Arq. Édgar Santiago Ferreyra Alanís
Maravillas del México Antiguo



Documentación tridimensional del patrimonio cultural mexicano, presente y futuro

Lic. Ángel Mora Flores
Laboratorio de Imagen y Análisis Dimensional, Unidad de Apoyo Tecnológico para Monumentos Históricos, Coordinación Nacional de Monumentos Históricos (CNMH), Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), México

Nota: Imágenes con enlace Web fueron transmitidas por INAH TV durante el evento realizado en el Auditorio Jaime Torres Bodet (Museo Nacional de Antropología).

Crédito: CICM-imagen en evento. Esta página
Excepto retratos oficiales de ponentes.

Las tecnologías de representación digital visual del patrimonio abarcan un enorme espectro de posibilidades, que van desde la cobertura de regiones enteras mediante LiDAR (*Light Detection and Ranging*), hasta la creación de modelos digitales de pequeños artefactos. Al disminuir el costo de su aplicación y aumentar su potencia y facilidad de uso, se han convertido en una de las herramientas más utilizadas a escala internacional para el registro, investigación, análisis, restauración/conservación y divulgación del patrimonio cultural, especialmente del arqueológico e histórico.

La confluencia de las nuevas tecnologías digitales con las nuevas estrategias de comunicación, ofrece un horizonte promisorio en la tarea crucial de promover una cultura de conservación.

La palabra mágica en este esfuerzo es la interpretación, particularmente la interpretación temática del teórico y divulgador norteamericano Sam Ham, de la cual Manuel Gándara Vázquez, catedrático e investigador del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), ha basado su propia propuesta y la ha complementado con sus aportaciones, la cual denomina como "divulgación significativa", en la que aborda cómo crear estos significados a partir de vínculos afectivos para mejorar la comunicación con los grandes públicos. Las siguientes aportaciones han sido influenciadas por esta metodología.

Las representaciones digitales a partir del trabajo titánico de investigación y conservación, nos muestran y comunican toda esta vasta información especializada, pero a veces es necesario traducirla en un lenguaje visual accesible para los grandes públicos. Gracias a estas herramientas podemos ser como un gusanito y ver por debajo de grandes estructuras, o volar encima de estos lugares patrimoniales para poder apreciarlos en su majestuosidad. Gracias a las representaciones digitales y las nubes de puntos podemos ser como fantasmas, atravesar sus paredes y ver cómo estaban constituidos, podemos manipular los objetos sin dañarlos y satisfacer nuestra curiosidad sobre el pasado y las personas que lo habitaron. Las herramientas de representación digital enfocadas a la divulgación, se convierten en narrativas audiovisuales que permiten la interpretación de un conocimiento muy especializado para públicos que no son especialistas, pero que se interesan en estos temas. Y al generar estos vínculos emocionales, a partir del asombro, podemos inspirar y compartir este conocimiento, al transformarlo en un beneficio colectivo que permite el rescate de valores patrimoniales, fomentar la identidad y el orgullo de lo que ha sido capaz de producir la humanidad, para heredarlo a las nuevas generaciones como cómplices de esta conservación.

Moderadora: **Mtra. Teresa Menchelli Pérez**

Reconstrucción 3D y su impacto en la renovación museográfica: El caso de La Quemada, Zacatecas

Dr. Manuel Dueñas García

La aplicación de tecnologías de representación arqueológica en 3D ha transformado las posibilidades de reconstrucción de imágenes virtuales del pasado, ofreciendo nuevas herramientas para la interpretación, conservación y divulgación del patrimonio cultural. Este enfoque se inscribe dentro de un marco normativo internacional que, desde la Carta de Atenas (1931) y hasta los Principios de Sevilla (2011), ha promovido directrices sobre la preservación, intervención y representación del patrimonio histórico. El presente trabajo explora la aplicación de estas tecnologías en el caso específico de La Quemada, en el estado de Zacatecas.

Desde la aparición de conceptos como patrimonio virtual, arqueología digital y museos virtuales, la responsabilidad de presentar imágenes rigurosas del pasado se ha vuelto un eje central en la práctica arqueológica. En un contexto de acceso masivo y diverso a la información histórica, las representaciones visuales desempeñan un papel crucial en la transmisión de los valores patrimoniales. Para evitar malas interpretaciones o construcciones erróneas de la historia, resulta imprescindible que las reconstrucciones virtuales estén sólidamente documentadas.

Asimismo, es importante distinguir entre los conceptos de reconstrucción virtual y recreación virtual. Mientras que la reconstrucción busca representar de manera precisa un objeto o estructura a partir de evidencia física, la recreación virtual tiene un alcance más amplio al intentar reconstruir entornos completos y significados culturales asociados a los sitios arqueológicos.

La documentación, aunque a menudo subestimada por considerarse una etapa tediosa, constituye una de las fases sustanciales en los procesos de reconstrucción. Permite preservar la integridad de los datos, evaluar críticamente las fuentes de información y facilita la actualización de interpretaciones, a medida que surgen nuevos descubrimientos o avances tecnológicos. Si bien la creación visual tiende a captar más atención, el trabajo de fondo en la documentación es el que asegura la calidad y sostenibilidad de toda reconstrucción patrimonial.

De acuerdo con los Principios de Sevilla, las reconstrucciones pueden orientarse a ambos niveles de representación. En el caso de La Quemada, el trabajo de reconstrucción no se limitó a los elementos arquitectónicos, también incorporó aspectos de la vida cotidiana de sus antiguos habitantes, lo que resultó en una visión más completa y matizada del contexto histórico.



Figura 1. Ubicación de La Quemada en el septentrión mesoamericano. Elaboración propia (2025) a partir de datos del INEGI: Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) y Marco Geoestadístico (versión 2024). Fuentes: INEGI, CEM 3.0 (*https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/*) y Marco Geoestadístico 2024 (*https://www.inegi.org.mx/temas/mg/*). Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=oLvJ3nByF1eQHZij&t=12560*

Estas representaciones no son meramente imágenes reconstructivas, se integran profundamente en el patrimonio cultural, llegando a ser vistas por el público como parte inseparable de la investigación arqueológica. El impacto de estas imágenes se amplifica con el uso creciente de la inteligencia artificial (IA), con la cual se pueden generar representaciones visuales realistas a partir de descripciones textuales. En este escenario, la figura del usuario se vuelve central: el patrimonio virtual se construye con el público y exige transparencia en los procesos digitales, en lo que se ha denominado "ciberarqueología".

Un ejemplo reciente que ilustra esta situación es la circulación en redes sociales de una reconstrucción facial de la momia del faraón egipcio Ramsés, realizada mediante inteligencia artificial a partir de fotografías de tejidos desecados. La falta de criterios científicos rigurosos en este tipo de recreaciones, pone de manifiesto la importancia de divulgar con claridad los métodos y fundamentos empleados en las reconstrucciones virtuales del pasado.

En este contexto, la documentación adquiere un papel central. El análisis y mapeo detallado de las afirmaciones reconstructivas permiten evaluar críticamente la calidad y relevancia de los datos utilizados, preservando su integridad y facilitando su reutilización en futuras investigaciones. Para abordar este desafío, se han desarrollado modelos metodológicos como el de la argumentación arqueológica, propuesto por George Bruseker, Anaïs Guillem y Nicola Carboni (2015), que introduce un enfoque semántico destinado a documentar el proceso reconstructivo de manera estructurada y rastreable.

La metodología aplicada comprende distintas fases: la comisión de la reconstrucción, la recopilación de datos asociados a la documentación, la identificación de propuestas interpretativas, el análisis de espacios lógicos de volumen, la consideración de elementos *in situ* y *ex situ*, la producción visual de razonamientos y, finalmente, la elaboración de mapas de incertidumbre. Esta última herramienta se incorporó como una adaptación

metodológica adicional para redondear el proceso de documentación, permitiendo representar gráficamente los niveles de certeza en las distintas áreas reconstruidas.

Además, la sistematización de este proceso facilita la detección de lagunas de conocimiento y orienta nuevas preguntas de investigación, lo que mantiene viva la reflexión arqueológica a través del tiempo.

La aplicación de esta metodología no solo garantiza la trazabilidad de las proposiciones reconstructivas, sino que también permite su reevaluación conforme surjan avances tecnológicos o nuevos descubrimientos. Al identificar de manera sistemática las áreas de incertidumbre, se fomenta una investigación continua y una actualización constante de las interpretaciones arqueológicas.

Esta perspectiva resulta especialmente relevante en el estudio de La Quemada, un sitio emblemático ubicado en el septentrión mesoamericano, en la frontera norte de Mesoamérica, junto a centros clave como Teotihuacan, Tula; El Cerrito, en Querétaro; El Cóporo, en Guanajuato, y Santiago, en Aguascalientes. La Quemada se destaca por su ubicación estratégica y su impresionante complejidad arquitectónica, que incluye el monumental Salón de las Columnas —considerado el edificio techado más grande de Mesoamérica—, un juego de pelota, plataformas habitacionales, patios interconectados y una imponente ciudadela en la cima del asentamiento.

La documentación de La Quemada cuenta con una larga tradición que inicia en el siglo XVI con las crónicas de Pedro Almírez de Chirinos, seguida en los siglos XVIII y XIX por los trabajos de George Francis Lyon, Carl Nebel y Adela Breton; posteriormente, por las excavaciones de Leopoldo Batres y las restauraciones realizadas por Jiménez Betts en el siglo XX. Antes de la creación del INAH, diversos topógrafos independientes ya realizaban levantamientos y propuestas reconstructivas, mostrando el interés continuo en el sitio.

En este contexto, la necesidad de una documentación precisa y metodológicamente sólida, se hizo evidente durante el proceso de renovación museográfica del Museo de Sitio de La Quemada. Como parte de la comisión de reconstrucción, me encargué de la generación de modelos virtuales y de la realización de levantamientos topográficos mediante el uso de drones, tareas esenciales para sustentar las nuevas propuestas interpretativas con datos actualizados y de alta resolución.



Figura 2. Modelo fotogramétrico del Salón de las Columnas. Fuente: Modelo fotogramétrico del Salón de las Columnas. Fuente: Elaboración propia a partir de materiales obtenidos en el levantamiento de los trabajos en el INAH. Año de toma: 2019. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=FxxL-LTQ7B8_vMw7&t=12809*

El levantamiento de información tuvo como propósito fundamental alimentar la elaboración de cédulas explicativas destinadas tanto al museo como al recorrido del sitio. Estas cédulas buscaban documentar de manera precisa los elementos tangibles y concretos del patrimonio, integrando diversas fuentes como apuntes de excavación, dibujos arqueológicos, fotografías históricas y modelos tridimensionales recientes. Se utilizaron Sistemas de Información Geográfica (SIG) para planificar los vuelos con dron, definiendo cuadrantes específicos para optimizar la captura de datos. Posteriormente, se realizaron vuelos a distintas alturas, combinados con tomas pedestres, para integrar la mayor resolución posible en los modelos generados.

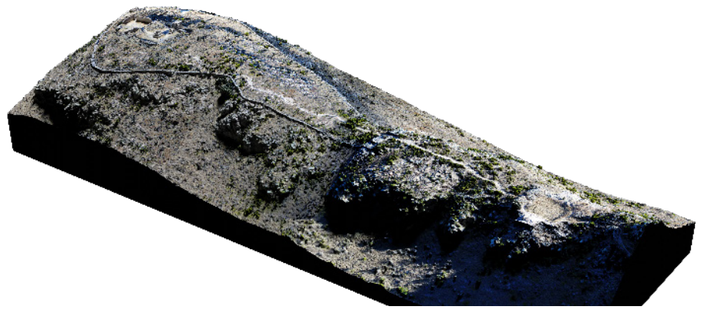


Figura 3. Reconstrucción 3D de la Ciudadela de La Quemada. Fuente: Elaboración propia a partir de materiales obtenidos en el levantamiento de los trabajos en el INAH. Año de toma: 2019. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=ZtWJ-G7zeL1yKgRb&t=12821*

La etapa de modelado digital se llevó a cabo utilizando Blender, lo que permitió generar bocetos detallados y dinámicos que fueron revisados de manera continua en colaboración con el encargado del museo. Este proceso facilitó la identificación y representación de objetos factuales presentes en el sitio, como la sala hipóstila, la pirámide votiva y la cuartería adyacente. Asimismo, para reforzar la consistencia de las interpretaciones, se integraron referencias históricas mediante la superposición de dibujos antiguos, como el realizado por Lelgemann a finales del siglo XIX, sobre los modelos digitales de elevación generados en 2020.

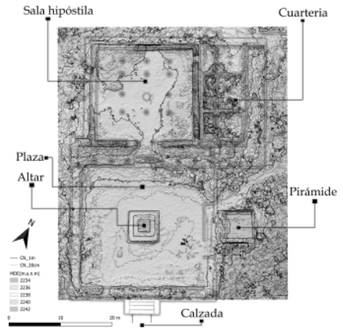


Figura 4. Superposición de dibujo histórico de Lelgemann sobre el modelo digital de elevación. Fuente: Elaboración propia. Año de toma: 2019. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=d08fyjOa7XKTwMKn&t=12848*

Las primeras investigaciones arqueológicas ya sugerían que los salones interiores de La Quemada eran espacios cerrados y oscuros, probablemente vinculados a rituales asociados con el simbolismo de las cuevas y el inframundo. En contraste, los atrios, patios y explanadas abiertas, habrían servido como escenarios para ceremonias públicas y actividades comunitarias. Esta diferenciación funcional entre los espacios internos y externos, pudo ser explorada y representada con mayor precisión gracias a los modelos 3D y las visualizaciones internas desarrolladas.

El análisis volumétrico de los espacios consideró factores como la altura de los muros conservados, la ubicación de postes excavados y las huellas arquitectónicas visibles, permitiendo proponer reconstrucciones coherentes de los volúmenes originales. Elementos *ex situ*, como fragmentos de cerámica y restos de pintura mural, complementaron la interpretación arquitectónica al sugerir decoraciones y acabados específicos.

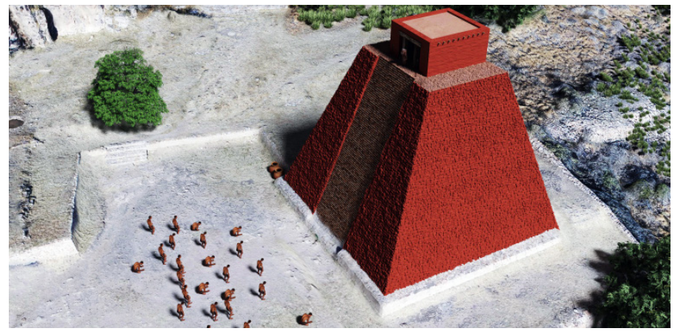


Figura 5. Reconstrucción virtual de la Pirámide Votiva de La Quemada. Fuente: Elaboración propia. Año de toma: 2019. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=HVs-P59zJtBxzl32&t=13030*

Complementando las reconstrucciones tridimensionales, se elaboraron mapas de escala de evidencia histórica, una herramienta crucial para comunicar el grado de certeza asociado a cada elemento representado. En estos mapas, los colores cálidos indican áreas donde la evidencia es sólida y bien documentada, mientras que los tonos fríos marcan aquellas zonas que derivan de interpretaciones más especulativas.

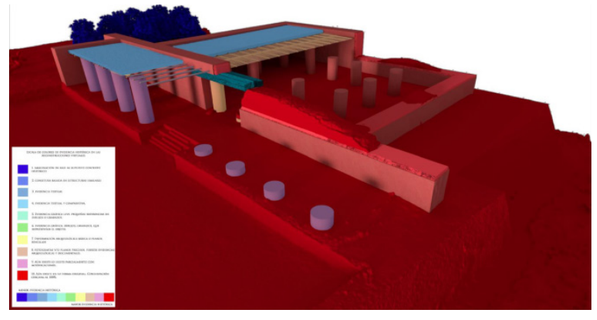


Figura 6. Mapa de incertidumbre en la reconstrucción de La Quemada. Fuente: Elaboración propia. Año de toma: 2019. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=iTVcBsQOzb1bPMz9&t=13039*

La información derivada de estos mapas de evidencia se integró en el museo mediante una maqueta interactiva, diseñada para ofrecer al público una experiencia de exploración activa. Al seleccionar un sector del sitio representado en la maqueta, los visitantes podían visualizar videos explicativos que mostraban las reconstrucciones propuestas y el grado de certeza de cada intervención. Asimismo, se instaló una señalética interactiva en el recorrido del sitio arqueológico, reforzando la conexión entre los espacios reales y sus interpretaciones virtuales.

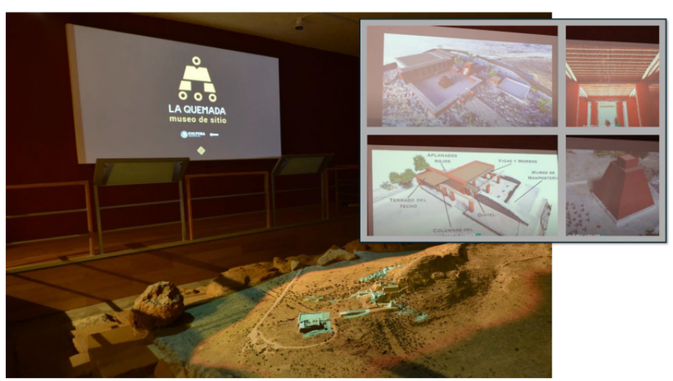


Figura 7. Implementación de modelos 3D en la maqueta interactiva del Museo de Sitio de La Quemada. Fuente: Elaboración propia. Año de toma: 2019. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=7BwtNn3o-xH96C8z&t=13104*

Un caso particularmente significativo es el de la pirámide votiva, cuya historia ha sido objeto de diversas fases de investigación e interpretación desde los trabajos pioneros de Leopoldo Batres en 1903, hasta las reconstrucciones digitales contemporáneas. La evolución de las hipótesis arqueológicas ha quedado plasmada en las cédulas informativas instaladas, las cuales documentan tanto los hallazgos como las reinterpretaciones sucesivas.

De este modo, la documentación detallada de las reconstrucciones virtuales no solo enriquece la experiencia del visitante y mejora la comprensión histórica y arquitectónica del sitio, sino que también se consolida como un legado científico fundamental. Al proporcionar un corpus de información sólido, estructurado y accesible, se garantiza la preservación del conocimiento arqueológico y se abren nuevas rutas para futuras investigaciones y restauraciones.

Fuentes de información

Aparicio Resco, P., & Figueiredo, A. (2017). *Evidencing Uncertainty in Virtual Reconstructions*. / Aparicio Resco, P., y Figueiredo, A. (2017/02/14). El grado de evidencia histórico-arqueológica de las reconstrucciones virtuales: Hacia una escala de representación gráfica. En *Revista Otarq. Otras arqueologías*.

Apollonio, Fabrizio I. (2024). The Three-Dimensional Model as a 'Scientific Fact': The Scientific Methodology en *Hypothetical Reconstruction. Heritage* 7(10):5413–5427.

Bruce, M., Anis, G., Gillam, L., & Carboni, N. (2017). *Semantically Documenting Virtual Reconstructions: Building A Path To Knowledge Provenance*. / Bruseker, G., Guillem, A., & Carboni, N. (2015). *Semantically Documenting Virtual Reconstruction: Building a Bath to Knowledge Provenance. ISPRS Annals of the Photogrammetry*, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.

Forte, M. (2011). "Cyber-Archaeology: Notes on the Simulation of the Past." En *Virtual Archaeology Review*. *VAR*. Volumen 2, Número 4. ISSN: 1989-9947. Mayo 2011.

López-Menchero Bendicho, V. M., *et al.* (2017). *Principles for the Seville Charter*.

Diez años digitalizando la ciudad prehispánica de Tzintzuntzan, México. Investigación y conservación, una propuesta de divulgación

Dr. José Luis Punzo Díaz (Participación virtual)
Dr. Alfonso Gastélum Strozzi
Arq. Édgar Santiago Ferreyra Alanís

Este año se cumplen 10 años del inicio de los trabajos sistemáticos de digitalización de la Zona Arqueológica de Tzintzuntzan. Comencemos hablando de la ciudad. Tzintzuntzan fue capital de un gran señorío, rival del mexica a la llegada de los españoles. Este señorío llegó a dominar una superficie aproximada de 75 mil kilómetros cuadrados. La ciudad fue construida a la orilla del lago de Pátzcuaro y en ella moraron cerca de 40 mil habitantes (Pollard, 1993), era el centro político desde el cual se tomaban todas las decisiones. Se trata de una ciudad sumamente compleja, que tuvo un crecimiento urbano muy rápido, además de su emplazamiento entre dos cerros, que la hizo resolver este fenómeno urbano de forma muy particular.

Si bien se trató de una gran ciudad con barrios habitacionales, talleres, edificios públicos y privados distribuidos por casi mil hectáreas, la mayoría de las investigaciones arqueológicas se ha reducido al estudio de las 15 hectáreas que actualmente se tienen abiertas al público y donde se ubican los edificios más relevantes. Destaca la Gran Plataforma de 250 metros de ancho por 450 metros de largo y más de 20 metros de altura, sobre la cual se desplantan cinco estructuras piramidales, que conocemos en Michoacán como yácatas y que poseen una forma característica de planta mixta. En ésta se encuentra una plaza muy grande de más de 77 mil metros cuadrados, donde se hacían distintos rituales.



Figura 1. Mapa de ubicación. Crédito: José Luis Punzo Díaz. Elaboración propia a partir de materiales obtenidos en el levantamiento Proyecto Tzintzuntzan de los trabajos en el INAH. Año de toma: 2023. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=ytLnk3Dt8kPeMJb3&t=13617*

Esta ciudad prehispánica ha llamado poderosamente la atención de los arqueólogos desde hace más de 100 años. Por Tzintzuntzan han pasado algunos de los arqueólogos más connotados que ha dado el país, entre ellos Nicolás León, Alfonso Caso, Daniel Rubín de la Borbolla, Román Piña Chan, Arturo Oliveros, por citar solamente algunos.

Digitalización para la investigación y conservación en Tzintzuntzan

Desde los trabajos realizados en 1888 por Charles Hasford, un inglés quien fue el primero en excavar en Tzintzuntzan, seguido por Nicolás León (León, 1888) y Carl Lumholtz (Lumholtz, 1987) a finales del siglo XIX, se hicieron mapas y fotografías que dan cuenta de los monumentos arqueológicos de Tzintzuntzan. Será, por supuesto, con los primeros proyectos arqueológicos profesionales en los años treinta del siglo XX hechos por Alfonso Caso (Caso, 1938) y especialmente Daniel Rubín de la Borbolla (Rubín de la Borbolla, 1941), cuando aparezcan los primeros levantamientos arquitectónicos de la zona arqueológica. Éstos y los subsecuentes proyectos arqueológicos se centrarán generalmente en la zona de la Gran Plataforma y sus cinco yácatas. Serán muy pocos estudios los que vayan más allá y busquen representar la ciudad completa, destacan los trabajos de Pollard (1977), Cabrera (1987) y Fernández-Villanueva (2005). Sin embargo, pese a sus grandes esfuerzos, solamente pudieron hacer un estudio de los elementos más importantes del sitio, haciendo falta miles de estructuras arqueológicas que hoy, con nuevas tecnologías, somos capaces de estudiar.



Figura 2. Zona Arqueológica de Tzintzuntzan. Crédito: José Luis Punzo Díaz. Año de toma: 2022. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=Zk430ElaxNk2bfbY&t=13682*

La llegada de la fotogrametría para la documentación arqueológica

Con el lanzamiento de los drones de consumo masivo hace un poco más de una década, diseñados para que fueran sencillos en su operación, dio inicio una época muy importante para el registro y digitalización del patrimonio. Estos dispositivos, en conjunto con *softwares* especializados, hicieron que la fotogrametría aérea permitiera obtener medidas precisas y modelos tridimensionales a partir del traslape de imágenes fotográficas siguiendo los principios de la óptica, la geometría proyectiva y la visión estereoscópica.

Fue así como hace justamente 10 años, iniciamos adquiriendo los primeros modelos digitales de los edificios arqueológicos de la Gran Plataforma y sus cinco yácatas. Ob-

viamente, a lo largo de estos 10 años hemos desarrollado variadas técnicas y probado equipos diferentes, mismos que han cambiado mucho y las calidades de las imágenes, igual. Lo que podemos mencionar sobre este trabajo es que a lo largo de estos 10 años hemos logrado tener una documentación muy precisa, sobre todo del área abierta al público, y conocemos muy bien cómo se han ido modificando y alterando las propias estructuras arqueológicas a lo largo de este tiempo. Esto ha sido una herramienta fundamental para la conservación arqueológica, estos modelos continuos tridimensionales nos han permitido monitorear deformaciones en las estructuras arqueológicas e intervenirlas antes de que sufran posibles colapsos (Punzo-Díaz *et al*., 2023).

Hoy día me atrevo a decir que la fotogrametría tanto aérea como terrestre, se ha convertido en una herramienta común en la mayoría de los proyectos arqueológicos en México. La accesibilidad de *softwares* y *hardwares* cada vez más potentes hacen que tengamos hoy la posibilidad de digitalizar muchos de los elementos en las excavaciones arqueológicas, objetos, rasgos arquitectónicos o sitios arqueológicos completos. Así, la digitalización del patrimonio ya está en el trabajo arqueológico de todos días.

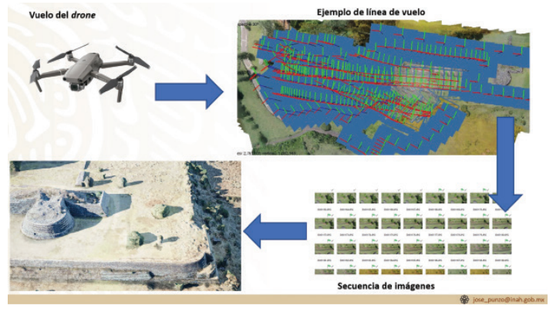


Figura 3. Trabajo fotogramétrico en la Zona Arqueológica de Tzintzuntzan. Crédito: José Luis Punzo Díaz y Alfonso Gastélum Strozzi. Elaboración propia a partir de materiales obtenidos en el levantamiento Proyecto Tzintzuntzan de los trabajos en el INAH. Año de toma: 2022. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=vBnfLxFK9fFrq3P4&t=13772*

Un nuevo paradigma el LiDAR

El LiDAR (*Light Detection and Ranging*) se ha convertido en nuevo paradigma en la investigación y documentación arqueológica, su aplicación en este campo ha sido por demás exitosa. Esta tecnología se basa en la emisión de un pulso láser, desde un dispositivo que puede ser fijo o en movimiento, en el cual es medido el tiempo en que éste regresa al sensor. Si bien la aplicación de esta tecnología en Mesoamérica inicia en 2009 (Chase, A. *et al*., 2014), en Michoacán rápidamente se implementará en 2011 (Fisher *et al*., 2011), será unos años después cuando podamos aplicarla en Tzintzuntzan (Punzo-Díaz & Sandoval, 2022).

En Tzintzuntzan hemos usado esta tecnología en tres formas. La primera se trata de levantamientos LiDAR fijos, los cuales han sido muy relevantes para paramentos arquitectónicos verticales. Por otra parte, hemos hechos digitalizaciones LiDAR con uso de equipos montados en drones y en avionetas. Estos dos tipos de levantamientos nos han permitido

poder hacer realmente un estudio de diferentes visualizaciones de la zona arqueológica. Esta tecnología nos ha permitido pasar de apenas cerca de una centena de estructuras arqueológicas registradas en la ciudad en los más de 100 años de mapas generados, a tener en la actualidad más de dos mil estructuras arqueológicas identificadas a través de estas visualizaciones digitales y que actualmente estamos contrastando en campo para su verificación y análisis.

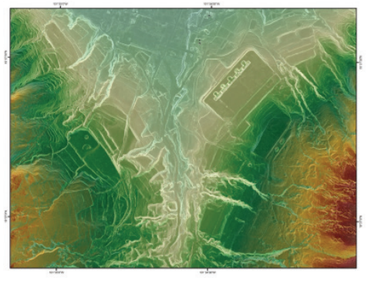


Figura 4. Modelo LiDAR de la zona central de la ciudad prehispánica de Tzintzuntzan. Crédito: Proyecto Tzintzuntzan. Año de toma: 2023. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=0Au0Klndx8veCnKV&t=13874*

Obviamente este tipo de digitalizaciones nos ha permitido tener mejores estrategias para la conservación y la documentación del patrimonio y, sobre todo, ser la base de los planes de manejo de la zona arqueológica.

Divulgación y acceso a la ciencia

Creación de un paseo virtual

Si bien estos esfuerzos de digitalización fueron pensados en primera instancia para la investigación y la conservación del vasto patrimonio de la ciudad de Tzintzuntzan, toda esa información se constituyó en una herramienta muy potente para la divulgación del patrimonio.

Con el apoyo de *National Geographic* y un equipo de Maravillas del México Antiguo a cargo del arquitecto Santiago Ferreyra, se dio inicio a un ambicioso proyecto de reconstrucción virtual de toda la ciudad prehispánica. En primer lugar, a partir del modelo tridimensional, generado con la nube de puntos obtenida con tecnología LiDAR, se inició un amplio trabajo de reconstrucción de los edificios arqueológicos localizados de manera digital, colocando más de mil estructuras. Si bien, ésta ha sido la base del paisaje digital del modelo, cabe mencionar que hasta la fecha hemos realizado múltiples temporadas de campo, donde a través de la verificación en campo hemos podido detallar aún más el plano de la ciudad, duplicando los elementos arqueológicos detectados en el modelo LiDAR. Esta herramienta nos está permitiendo entender la ciudad en su totalidad, en primer lugar, desde su contexto histórico cultural, pero especialmente estamos comprendiendo su trazado urbano, el cual se fue adecuando a los cerros de manera irregular, pero estableciendo jerarquías espaciales que la ordenaban, al igual

que su infraestructura y arquitectura. Hemos podido ir detallando a través del estudio combinado, digital, pero siempre yendo al campo a contrastar en un ir y venir constante, detectando y documentando desde los edificios más importantes, hasta los espacios más pequeños, las redes hidráulicas muy importantes en la ciudad, así como materiales y técnicas constructivas. De igual forma, con el apoyo del Instituto de Ciencia y Tecnología Aplicada de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), instancia con la que hemos tenido una colaboración muy estrecha en todos estos campos los últimos 10 años, se han realizado modelos tanto de estructuras arqueológicas, como modelos de objetos que hemos elaborado con distintas metodologías.

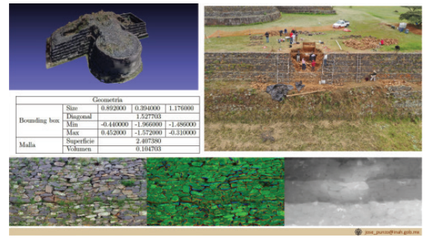


Figura 5. Aplicación de estudios fotogramétricos para la atención de labores de conservación. Crédito: Alfonso Gastélum Strozzi y José Luis Punzo Díaz. Elaboración propia a partir de materiales obtenidos en el levantamiento Proyecto Tzintzuntzan de los trabajos en el INAH. Año de toma: 2023. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=J8LQkNgYwMU2a9Qr&t=13922*

Con todo este material, en conjunto con la Dirección de la Mediateca del INAH, iniciamos un proyecto en el cual vaciamos toda esta información digital recalcando la imperante necesitad de tener un resguardo, a largo plazo, de este patrimonio digital. Así, en conjunto con ellos desarrollamos un proyecto de creación de un paseo virtual de la zona arqueológica, donde está registrada toda la documentación que teníamos de años de trabajo en la zona, la que tratamos de plasmar en este modelo para el uso público.

El sistema interactivo

La construcción de este sistema interactivo buscó generar una herramienta que permitiera conocer la zona arqueológica vía remota. Este sistema se construyó primeramente con la localización de 21 puntos importantes en la zona arqueológica donde, en conjunto con el equipo de la Mediateca del INAH, se realizaron visualizaciones de 360 grados de la imagen actual del sitio. En ese sentido, se procedió a diseñar un recorrido por dichos puntos a través de un discurso que incluyó la creación de un cedulario que permitiera al usuario transitar por los distintos puntos de la zona y poder ir conociendo la importante historia de esta ciudad prehispánica, desde su refundación hasta su ocaso tras la llegada de los españoles.



Figura 6. Reconstrucción de la ciudad prehispánica de Tzintzuntzan. Crédito: Édgar Santiago Ferreyra Alanís y José Luis Punzo Díaz. Año de toma: 2023. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=dZI3B111N8lw51b1&t=14035*

Otra idea que se tenía en este proyecto era la de mostrar la historia de estos más de 100 años de documentación de los trabajos con los que cuenta la zona arqueológica. Para ello se incluyeron fotografías que van desde finales del siglo XIX hasta la segunda parte del siglo XX, donde se muestran los trabajos arqueológicos realizados, así como algunos detalles de las excavaciones y todas ubicadas en los lugares donde se llevaron a cabo, gracias a la imagen actual de 360 grados, lo que permite al usuario reconocer el aspecto de los monumentos durante sus trabajos arqueológicos, así como reconocer a los trabajadores de la comunidad y a los arqueólogos que han puesto su empeño en la conservación e investigación de la zona. De igual forma, para visibilizar los acervos resguardados, muchos de ellos en las bodegas de los museos del INAH, se integraron modelos tridimensionales de piezas que se han recuperado a lo largo de los años, asociados a las fotografías antiguas o planos, lo que nos ha permitido en muchos casos iniciar procesos de investigación para reintegrar, de manera digital, las ricas ofrendas que se han recuperado, especialmente en la parte frontal de la Gran Plataforma de Tzintzuntzan. Así, podemos manipular los objetos, acercarnos a ellos y ver estas piezas que normalmente vemos detrás de las vitrinas, en el mejor de los casos, además de apreciar detalles, ya que estos modelos nos permiten acercarnos más a los objetos.

Tal vez uno de los elementos más relevantes fue la reconstrucción virtual del sitio, a la que nos hemos referido. Una vez con este paisaje digital creado, nos dimos a la tarea de generar 21 vistas de 360 grados en los mismos puntos que se hicieron las tomas fotográficas y tratando de emular la misma altura visual, lo que permitió empatar ambas imágenes y generar una transición al accionar un botón y pasar de la imagen actual de la zona arqueológica al modelo de reconstrucción virtual, el cual se generó como los datos arqueológicos nos indican que debió ser la ciudad a inicios del siglo XVI. Así tratamos de crear escenas del uso de espacios, además de videos, que estuvieran relacionados con el discurso de la visita virtual, lo que permite al usuario interactuar de una forma completamente novedosa con el patrimonio arqueológico, dándole un sentido mayor a las dinámicas sociales que sucedieron en estos lugares y que son difíciles de imaginar, recreando la vida de sus habitantes buscando generar experiencias de realidad aumentada y de realidad virtual en este sistema interactivo. Si bien hasta la construcción del modelo multimedia muchos datos de investigación se encuentran ya incluidos, especialmente en la Gran Plataforma, aún hay un campo muy importante para hacer una

nueva versión que incluya de manera más activa el entorno completo de la ciudad, su relación con el paisaje, sus usos y la dinámica social que hoy entendemos mejor.

Del sistema interactivo a un Sistema Educativo Multimedia para contextos formativos

Toda esta información que está en línea, es accesible para todo el público y permite tener un acercamiento diferente a la zona arqueológica, lo que ha tenido buena recepción por parte de los usuarios. Al darnos cuenta de esto y especialmente entre los más jóvenes, diseñamos un proyecto junto con la doctora María Eugenia Cendejas del Centro INAH Michoacán, para presentar el sistema interactivo en escuelas de manera remota (Kanimozhi, 2022; Romero & Ventura, 2020). En este sentido buscamos transformarlo en un Sistema Educativo Multimedia para Contextos Formativos (SEMCF) que al ser un sistema de recursos multimedia, generamos breves talleres y cuestionarios para su aplicación y autoevaluación en clase, además de las imágenes, videos, esquemas y textos emergentes.

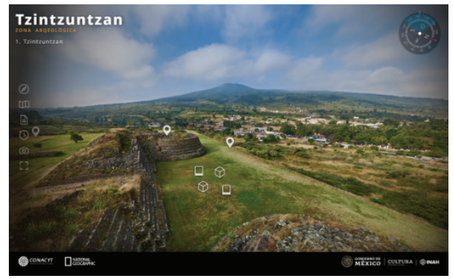


Figura 7. Sistema multimedia de la Zona Arqueológica de Tzintzuntzan. Crédito: Mediateca-INAH. Link *https://mediateca.inah.gob.mx/islandora_74/islandora/object/visitavirtual%3A78* Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=c9VIL9wZthxDIN5U&t=14180*

El SEMCF se ha implementado en un total de 20 escuelas de 15 municipios del estado, tanto en ciudades como Morelia o Pátzcuaro, hasta pequeñas comunidades. Se realizaron las visitas virtuales con un total de 513 estudiantes de 19 escuelas públicas y una privada, 18 de nivel primaria, la mayoría con salones multigrado, y dos de nivel secundaria. Se trató de escuelas que generalmente se ubicaban en zonas urbanas de alta marginación o en zonas rurales. Cabe mencionar que en la actualidad, prácticamente todas las escuelas tenían acceso a Internet en las aulas o en algún espacio de las propias escuelas, excepto una. Gracias a esto pudimos llevar la zona arqueológica a más de 500 niños.

El tour virtual lo pudimos dar tanto a los maestros como a los grupos de alumnos. Nos topamos con que más del 95 por ciento de los niños nunca habían ido a la Zona Arqueológica de Tzintzuntzan, y los únicos que habían ido era porque habitaban en Pátzcuaro o viven ahí, o sea tenían sus escuelas muy cerca del lugar.

La manipulación del sistema fue realizada primero de manera remota y posteriormente, durante los talleres, los propios alumnos y profesores exploraron por su cuenta el multimedia. Esto se convirtió en una actividad sumamente atractiva para ellos, además de sorprenderlos, la consideraron una herramienta muy fácil de usar. Los estudiantes es-

taban muy contentos, tenemos registros de lo mucho que les gustó el sistema porque "parecía que volaban en las zonas", sobre todo para los que nunca habían visto una zona arqueológica. Esto detonó muchas cuestiones, haciendo que padres de familia se organizaron para visitar Tzintzuntzan y algunos, incluso, fueron hasta Teotihuacan.

Me parece que esta herramienta es muy importante para la divulgación efectiva y para llevar nuestras zonas arqueológicas a lugares más alejados, donde muchas veces es muy difícil incidir, detonando un genuino interés de la comunidad en el uso y disfrute del patrimonio.



Figura 8. Aplicación del Sistema Educativo Multimedia en escuelas. Crédito: María Eugenia Cendejas en los trabajos en el INAH-Michoacán. Año de toma: 2024. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=qd2DLcDGxVupkkHH&t=14548*

Una última reflexión

Para concluir, creo que estos procesos de digitalización y documentación detallada son fundamentales tanto para la preservación como para la conservación y la investigación, pero creo que algo muy importante, y que no debemos perder de vista, es que son una herramienta potente para el acceso global de la investigación científica, para la divulgación y educación del patrimonio cultural, algo que a veces los investigadores dejamos de lado, pero que es una de nuestras tareas fundamentales de incidir en la población. Este tipo de herramientas digitales son claves para el acceso equitativo a la ciencia.

La conectividad digital y el acceso abierto al conocimiento, tanto especializado como, en este caso, de divulgación, coadyuva a generar agendas de investigación que promuevan metodologías participativas y a la co-construcción de conocimiento. Así, nuestros esfuerzos en materia de divulgación deben estar encaminados a traducir el conocimiento generado, en lenguajes accesibles y en distintos formatos atractivos para los diferentes públicos, promoviendo la apropiación social del conocimiento.

Agradecimientos

Éste es un trabajo de muchos colaboradores e instituciones. Agradecemos los financiamientos que tuvimos del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) proyecto A1-S-42462, de *National Geographic* proyecto NGS-89765R-21, a DJI por el uso de los drones, a María Eugenia Cendejas del Centro INAH Michoacán; a Enrique Garza González, productor y diseñador del sistema, y a Jimena Escobar Sotomayor, directora de Innovación Institucional del INAH, por el apoyo para este proyecto.

Fuentes de información

Cabrera, R. (1987). Nuevos resultados de Tzintzuntzan, Michoacán, en su décima temporada de excavaciones. In R. Brambila & A. M. Crespo (Eds.), *Primera reunión sobre las sociedades prehispánicas en el Centro Occidente de México, Memoria* (pp. 193–217). INAH.

Caso, A. (1938). *Exploraciones en Michoacán*. Segunda Temporada.

Chase, A., Chase, D., Awe, J., Weishampel, J., Iannone, G., Moyes, H., & Kathryn Brown, M. (2014). The Use of LiDAR in Understanding the Ancient Maya Landscape: Caracol and Western Belize. *Advances in Archaeological Practice*, 2(3), 208–221. *https://doi.org/:10.7183/2326-3768.2.3.208*

Fernández-Villanueva, E. (2005). *Una propuesta de conservación para la unidad urbana arqueológica histórica de Tzintzuntzan* (Maestría), Universidad de Guanajuato.

Fisher, C., Leisz, S., & Outlaw, G. (2011). LiDAR at Angamuco. *PE&RS*, 77(10), 959–967.

Kanimozhi, G. (2022). Educational Data Mining in Blended Learning: an Updated Survey on Edm Techniques and Learning Tools Used in Bl. *Shodhsamhita: Journal of Fundamental & Comparative Research*, VII(8).

León, N. (1888). *Las Yácatas de Tzintzuntzan*. Anales Del Museo Michoacano, 1(1), 65–70.

Lumholtz, C. (1987). *Unknown Mexico* (Reprint 19). Dover Books.

Pollard, H. (1977). An Analysis of Urban Zoning and Planning at Prehispanic Tzintzuntzan. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 121(1), 46–69.

Pollard, H. P. (1993). *Tariacuri's Legacy: The Prehispanic Tarascan State*. University of Oklahoma Press.

Punzo-Díaz, J. L., & Navarro-Sandoval, F. L. (2022). Archaeological Survey of Tzintzuntzan, an Ancient City in Michoacan, by means of LiDAR Technology: First Results. *Arqueología Iberoamericana*, 49. *https://doi.org/10.5281/zenodo.5821758*

Punzo-Díaz, J. L., Chacón, S., Pérez Huerta, S., García González, B., & Miranda López, Y. (2023). *Proyecto Restauración de la Gran Plataforma frente a la Yácata N°1*.

Romero, C., & Ventura, S. (2020). Educational data mining and learning analytics: An updated survey. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 10(3). *https://doi.org/10.1002/widm.1355*

Rubín de la Borbolla, D. (1941). Exploraciones arqueológicas en Michoacán. Tzintzuntzan. Temporada III. *Revista Mexicana de Estudios Antropológicos*, 5(1), 5–20.

Documentación tridimensional del patrimonio cultural mexicano, presente y futuro

Lic. Ángel Mora Flores

El objetivo del presente artículo es exponer el acervo digital tridimensional que atesora el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) por conducto de la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos (CNMH), el cual se ha generado a lo largo de 15 años de investigación y aplicación tecnológica, para identificar a detalle la morfología arquitectónica del patrimonio histórico y arqueológico de México, así como la identificación de bienes muebles mediante la utilización de diversos instrumentos de medición de alta precisión, que facilitan la labor institucional en apoyo a la investigación, restauración y difusión.

Para hacer esto posible, primero se estableció contacto con dos instituciones académicas europeas, siendo la primera el Centro Departamental para el Desarrollo Integrado de Procedimientos Automáticos para la Restauración de Monumentos (DIAPReM, Development of Integrated Automatic Procedures for Restoration of Monuments), de la Universidad de Estudios de Ferrara, Italia. Vinculación que se da en un primer momento en 2007, gracias al interés del arquitecto Salvador Aceves García, y de los doctores Saúl Alcántara Onofre, Natalia Fiorentini Cañedo y María Sánchez Vega, por lo cual se realizan dos registros tridimensionales en México. El segundo momento de vinculación académica se dio entre 2008 y 2010 (Herráez y otros, 2010) con el Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la Universidad Politécnica de Valencia, España, en el marco del proyecto de colaboración denominado "Implementación de nuevos métodos de documentación y registro fotogramétrico digital para la protección y puesta en valor del patrimonio monumental mexicano", financiado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) y el Consejo Nacional para la Cultura y las Artes (Conaculta), institución encargada, en su momento, de coordinar las políticas, organismos y dependencias tanto de carácter cultural como artístico.

Como resultado de la cooperación internacional, se creó el Laboratorio de Imagen y Análisis Dimensional (LIAD) en lo que anteriormente se conocía como la Unidad de Informática de la CNMH, hoy denominada Unidad de Apoyo Tecnológico para Monumentos Históricos. El LIAD fue supervisado de manera presencial y a distancia por los catedráticos españoles y a partir de julio de 2010, cuando concluyó el proyecto de Colaboración, opera de forma autónoma mediante una metodología de trabajo que se ha venido mejorando y simplificando en el uso del LiDAR (*Light Detection and Ranging*) que se traduce como detección y medición por luz, con especialidad en TLS (*Terrestrial Laser Scanner*),

la columna vertebral del proyecto. En los años subsecuentes se han incorporado otras tecnologías para la documentación del patrimonio cultural mexicano, como se explicará más adelante.

Como toda tecnología, el LiDAR TLS y el *software* especializado denominado Cyclone, en sus distintos módulos, requieren de mantenimiento y actualización constante; de ahí que el financiamiento por terceros ha sido de mucha utilidad, como lo fue en 2014 la aportación económica del entonces Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), hoy Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt), mediante la participación en el programa Apoyo al Fortalecimiento y Desarrollo de la Infraestructura Científica y Tecnológica. En 2020, mediante un Acuerdo de Aportación celebrado entre el INAH y la Embajada de Hungría en México, se recibió una aportación económica en el marco de ayuda internacional por los sismos ocurridos en septiembre de 2017 en nuestro país. La intención fue fortalecer las capacidades técnicas del personal del INAH mediante la actualización del *software* especializado Cyclone, la adquisición de un dron y una columna telescópica para el LiDAR TLS, entre otros insumos adquiridos. Cabe mencionar que el INAH, a lo lago de 15 años, ha destinado de manera ininterrumpida recursos fiscales al LIAD, para cubrir las necesidades de operación del personal técnico para realizar los levantamientos arquitectónicos, así como los rubros de nómina y servicios básicos.

Presente, documentación tridimensional del patrimonio cultural mexicano

A la fecha, se han realizado 142 estudios geométricos con la utilización del LiDAR TLS en distintos estados de la República Mexicana, que en algunos casos se requirió de varias temporadas de trabajo de campo para avanzar en la reconstrucción digital de los modelos tridimensionales en nubes de puntos, que se elaboran a través de múltiples tomas o estaciones de escaneo con precisión milimétrica y, posteriormente, en gabinete son interpretadas por los especialistas para conformar un gemelo digital escala 1:1 en nube de puntos. Estos puntos son ubicados espacialmente en coordenadas únicas X, Y y Z, por lo cual se obtienen millones de mediciones milimétricas. Los estudios van desde la escala artefactual, como es el patrimonio histórico mueble y asociado a inmueble, así como estudios geométricos arquitectónicos para la rehabilitación del patrimonio histórico afectado por los sismos de 2017 con daños en 11 entidades federativas. Por lo anterior, se instrumentó una labor titánica para rehabilitar 2 mil 340 inmuebles bajo competencia del INAH, que registraron distintos grados de afectación. Los estudios geométricos, en algunos casos, se dirigieron mayormente a inmuebles ubicados en la zona centro y sur del país, por encontrarse en las zonas sísmicas a lo largo del océano Pacífico que comprenden los estados de Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Jalisco y Colima.

Los levantamientos arquitectónicos, así como la elaboración de centenares de planos base y específicos, fueron compartidos con distintos especialistas del INAH, principalmente con la Subdirección de Supervisión de Proyectos y Obras Externas de la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos, así como de otras dependencias gubernamentales

y de investigación, para desarrollar los proyectos de restauración. Algunos de estos casos de estudio se ubicaron en la Ciudad de México, en la alcaldía Cuauhtémoc, como el Santuario de Nuestra Señora de Los Ángeles (Figura 1) que presentó colapso parcial de su cúpula, la Basílica de San José, la parroquia de San Fernando y el templo de la Santa Veracruz. En la alcaldía Milpa Alta, las parroquias de San Pablo Apóstol y de San Salvador Cuauhtenco. El templo de San Gabriel Arcángel, en la alcaldía Miguel Hidalgo. El templo de San Jerónimo Lídice, en la alcaldía Magdalena Contreras; y el templo y antiguo Convento de los Santos Apóstoles Felipe y Santiago en la alcaldía Azcapotzalco.

En el estado de Morelos en marzo de 2018, de forma conjunta con Stefano Bertocci y Matteo Bigongiari, catedrático y estudiante, respectivamente, de la Universidad de Florencia, Italia (Università degli Studi di Firenze), y de Reynaldo Esperanza de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se realizó un proyecto de colaboración para que las instituciones utilizaran sus tecnologías disponibles. De esta manera, se usaron dos LiDAR TLS para ejecutar el levantamiento arquitectónico del conjunto conventual de San Guillermo Totolapan que presentó daños severos por sismo (Figura 2), perteneciente a la ruta de los 15 monasterios ubicados en las faldas del volcán Popocatépetl, declarados Patrimonio Mundial por la UNESCO el 17 de diciembre de 1994, los cuales se ubican en los estados de Morelos, Puebla y Tlaxcala. El principal objetivo fue reducir los tiempos de ejecución en los trabajos de campo, así como recursos humanos y económicos. En el estado de Michoacán, el templo de Sevina, en el municipio de Nahuatzen, y el convento franciscano de Tarecuato, municipio de Tangamandapio, por los daños estructurales ocasionados por el sismo del 19 de septiembre de 2022, exactamente 5 años después del sismo de 2017 y 37 años del terremoto del 19 de septiembre de 1985.



Figura 1. Sección transversal del Santuario de Nuestra Señora de Los Ángeles, alcaldía Cuauhtémoc, Ciudad de México, dibujada en AutoCAD a partir de nube de puntos, abril de 2023. Crédito: LIAD-CNMH. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.



Figura 2. Modelo tridimensional en nube de puntos con fotografía del conjunto conventual de San Guillermo, Totolapan, Morelos, abril de 2018. Crédito: LIAD-CNMH. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Otra de las líneas de trabajo es brindar atención al patrimonio edificado que haya sufrido afectaciones por incendio, como fueron los casos de estudio del templo de la Santa Veracruz en la alcaldía Cuauhtémoc, Ciudad de México, en agosto de 2020. El templo de Santiago Apóstol en la comunidad indígena de Nurio (Figura 3), en Michoacán, inmueble del siglo XVII conocido como la Capilla Sixtina Purépecha (Michoacán, 2021) por su notable arquitectura de madera, que tuvo afectaciones en marzo de 2021 con pérdida de la cubierta y piso, coro, sotocoro, representaciones pictóricas y sus tres retablos barrocos, entre otros daños. En coordinación con el personal de la sección de monumentos históricos del Centro INAH Michoacán, se elaboraron decenas de planos específicos para realizar el proyecto de recuperación, de inicio para la reintegración de la cubierta y otros elementos estructurales y decorativos.

Uno de los casos más recientes, a petición de la dirección de la Zona Arqueológica de El Tajín, en el estado de Veracruz, fue el levantamiento arquitectónico de la estructura I para registrar los daños por incendio, elaborar el dibujo de la planta arquitectónica, secciones longitudinales y transversales, así como para definir un banco de nivel para todas las planimetrías y elaborar el proyecto para la reintegración de una cubierta.



Figura 3. Templo de Santiago Apóstol, Nurio, Michoacán, durante la etapa de levantamiento de daños con el LiDAR TLS, Leica Geosystems, modelo P20, marzo de 2021. Fotografía: Angel Mora Flores, LIAD-CNMH. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=6uVma32lT1hJ66Gp&t=15451*

A lo largo de 15 años de trabajo se han realizado levantamientos arquitectónicos de arquitectura religiosa como capillas, parroquias, templos, catedrales y conjuntos conventuales; y en arquitectura militar, el Fuerte de San Juan de Ulúa, en Veracruz, y el Fuerte de San Felipe Bacalar, en Quintana Roo (Figura 4).

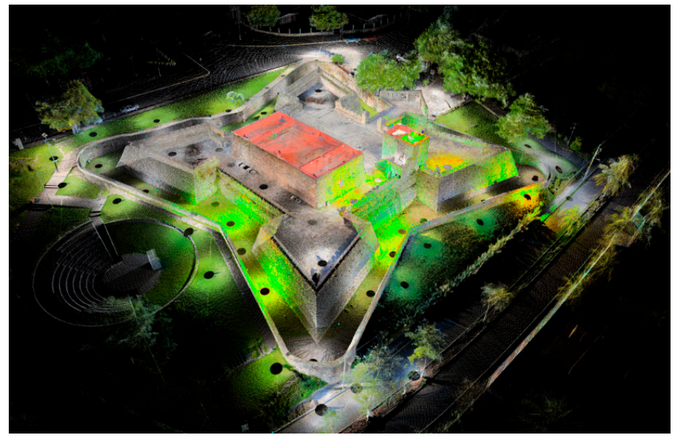


Figura 4. Modelo tridimensional en nube de puntos con fotografía del Fuerte de San Felipe Bacalar, noviembre de 2014. Crédito: LIAD-CNMH. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=a8CgEjOsTT_Fj1dJ&t=15539*

En arquitectura hidráulica se trabajó el complejo hidráulico del Acueducto del Padre Tembleque, en el Estado de México e Hidalgo (Figura 5), conformado por seis arquerías, tres de ellas de grandes dimensiones, cajas de agua, aljibes y algunos segmentos del apantle, que es visible por donde recorría el agua en el siglo XVI con una trayectoria aproximada de 48.2 kilómetros.



Figura 5. Modelo tridimensional en nube de puntos con fotografía de la arcada principal de Tepeyahualco del complejo hidráulico del Acueducto del Padre Tembleque, estados de Hidalgo y México, mayo de 2010. Crédito: LIAD-CNMH. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=a8CgEjOsTT_Fj1dJ&t=15539*

Se estima que un 25 por ciento del acervo patrimonial documentado mediante la aplicación LiDAR TLS corresponde al ámbito arqueológico, esto se da en apoyo a otras unidades administrativas del INAH, como la Coordinación Nacional de Arqueología, el

Consejo de Arqueología y algunos Centros INAH, con algunos casos de estudio realizados en la Zona Arqueológica del Templo Mayor en la Ciudad de México, la Zona Arqueológica de Chichén Itzá, en Yucatán, como uno de los primeros trabajos realizados por el personal técnico del LIAD; la Zona Arqueológica de Calakmul en el estado de Campeche, para documentar los túneles y segmentos de las subestructuras pertenecientes a la estructura II; la Zona Arqueológica de Cacaxtla en Tlaxcala, y en fechas recientes se brindó apoyo al Museo del Templo Mayor, en particular para las exposiciones Tetzáhuitl. Los presagios de la Conquista de México-Tenochtitlan, y Cuauhtémoc. Historia y memoria.

Asimismo, en apoyo al Programa de Arqueología Urbana (PAU) en la Ciudad de México, se realizó el registro tridimensional del Huei Tzompantli de Tenochtitlan encontrado en la calle de Guatemala número 22, y la cabeza de serpiente ubicada al interior del inmueble que albergó la Antigua Escuela Nacional de Jurisprudencia, en la esquina de las calles de República de Argentina y San Ildefonso. Cabe mencionar que uno de los proyectos más largos que se han documentado durante las distintas etapas de excavación arqueológica, fue el Proyecto Tlalocan: "Camino bajo la tierra", en Teotihuacan (Gómez & Gazzola, 2018), encabezado por el arqueólogo Sergio Gómez, para el cual se realizaron 11 etapas de registro tridimensional. La primera se realizó el 29 de septiembre de 2009 y la última el 19 de noviembre de 2015. El resultado está plasmado en la figura 6, donde se observan las 113 tomas realizadas con el LiDAR TLS y que conforman el modelo tridimensional final, donde nueve de las etapas se realizaron con un equipo Leica Geosystems, modelo ScanStation2, un equipo de prestaciones tecnológicas muy inferiores a los que actualmente se encuentran disponibles en el mercado, aunado a las condiciones de humedad, profundidad y espacio, por lo cual en una jornada de trabajo únicamente se llegaron a producir entre seis y siete tomas o estaciones de escaneo.

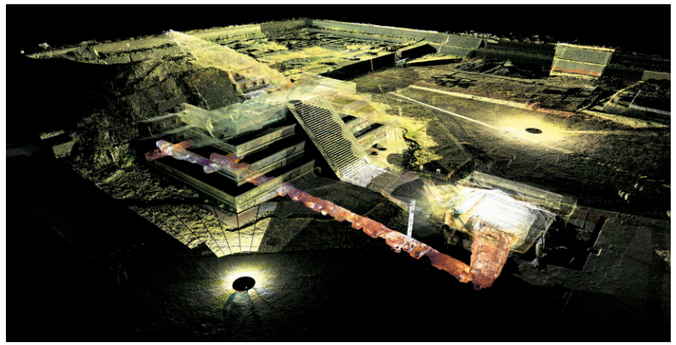


Figura 6. Modelo tridimensional final en nube de puntos con fotografía del túnel bajo el Templo de la Serpiente Emplumada, proyecto Tlalocan, camino bajo la tierra, zona arqueológica de Teotihuacan, Estado de México, noviembre de 2015. Crédito: LIAD-CNMH. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento. INAH TV: *https://www.youtube.com/live/XVCz0uRZXO0?si=dlvVC1hnMljjYwuc&t=15576*

El Instituto Nacional de Antropología e Historia por conducto de la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos en alianza con la Sociedad Mexicana de Egiptología, dirigida por la egiptóloga Gabriela Arrache Vértiz, en el año 2018, se realizó el levan-

tamiento arquitectónico de la Tumba Tebana 39 (TT39) bajo la dirección del maestro Manuel Villarruel Vázquez, la cual se ubica en el Valle de los Nobles, en la región anteriormente conocida como la antigua Tebas, capital de Egipto durante el Imperio Medio y el Nuevo Imperio. La tumba perteneció a Puimra quien fue el segundo sacerdote de Amón durante el periodo faraónico de Tutmosis III y Hatshepsut, Dinastía XVIII, hacia el año c.a. 1500 a.C. Se trata de un complejo funerario excavado en la roca, a lo que se le conoce como hipogeo. El modelo tridimensional elaborado en nube de puntos ha permitido en fechas recientes imprimir una maqueta a escala mediante el método de manufactura aditiva para ser exhibida en el Museo Regional de Puebla (MUREP) durante la exposición temporal Arqueología Mexicana en Egipto (Cultura, 2024).

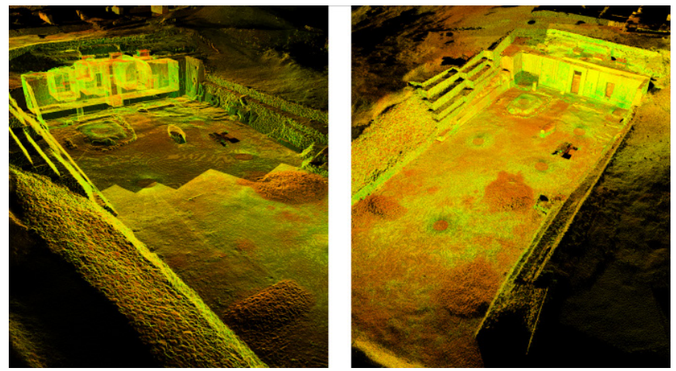


Figura 7. Modelo tridimensional final en nube de puntos de la Tumba Tebana 39, Luxor, Egipto, diciembre de 2018. Crédito: LIAD-CNMH. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

El perfil profesional del personal que ha integrado el LIAD ha sido interdisciplinario, mayormente conformado por arquitectos y arqueólogos con aportaciones de cada uno de ellos muy significativas, entre las que destaca la fotogrametría digital aportada por el arqueólogo Jorge Cuauhtémoc Martínez Huerta en 2016, que fue una de las primeras aplicaciones en el patrimonio histórico y arqueológico en la institución, convirtiéndose en una herramienta de trabajo cotidiana, aplicada al patrimonio mueble, y mueble asociado a inmueble, así como inmuebles de grandes dimensiones. Asimismo, gracias al financiamiento otorgado por la Embajada de Hungría en México, se logró elevar su aplicación mediante el uso del dron, lo que en algunos casos ha permitido complementar los levantamientos arquitectónicos realizados con el LiDAR TLS donde prácticamente es imposible colocarlo, como fue el caso de estudio del templo de Sevina, en el municipio de Nahuatzen en el estado de Michoacán, cuya cubierta es de teja a dos aguas con una altura mayor a 8 metros, la que aun usando la columna telescópica diseñada especialmente para elevar el LiDAR TLS a 6 metros como máximo, no hacía posible realizar su registro con una sola tecnología.

La fotogrametría digital y el LiDAR TLS son técnicas que se aplican en el patrimonio mueble e inmueble, para elaborar modelos tridimensionales en nubes de puntos como una de sus principales características, pero difieren en su forma de adquisición de datos.

La fotogrametría digital utiliza fotografías superpuestas a partir del uso de un *software* especializado para realizar un procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales, lo que permite generar datos espaciales en tres dimensiones para reconstruir la geometría del objeto en estudio, aun así es necesario escalar el modelo a una medida real, lo que dependerá de la precisión a la que se pueda llegar. Por su parte, el LiDAR TLS utiliza un láser para medir distancias directamente a partir de la reflectividad del color del material sin necesidad de escalar el modelo, ya que hablamos de un gemelo digital a la misma escala. Los resultados de ambas tecnologías son totalmente complementarios, siempre y cuando el especialista realice el empalme correcto de las nubes de puntos a partir de referencias comunes identificadas en los modelos. Para obtener una mejor precisión en la unión de los modelos complementarios, el personal técnico del LIAD establece puntos de control en tierra a partir del uso de un Sistema Global de Navegación Satelital (GNSS, Global Navigation Satellite System), lo que permite determinar la velocidad, posición y tiempo de un punto conocido, utilizando una red de satélites. A partir de estos datos se conocerán las coordenadas geográficas en cuanto a su latitud, longitud y elevación (altura) en metros sobre el nivel medio del mar (m s.n.m.).

El acervo de modelos tridimensionales realizados mediante fotogrametría digital está conformado por 151 registros, que se han aplicado mayormente en el patrimonio histórico mueble, y mueble asociado a inmueble, como retablos, pintura mural, monumentos históricos, y como apoyo a otras unidades administrativas del INAH, para documentar los hallazgos arqueológicos. A partir de la incorporación del dron al proyecto, los levantamientos aumentaron de forma considerable e innovaron su aplicación con vuelos al interior de los inmuebles, como se hizo para documentar los 10 retablos de la Catedral de San Bernardino de Siena en la alcaldía Xochimilco, en la Ciudad de México, en apoyo al proyecto de actualización del inventario de bienes culturales del templo de San Bernardino (Figura 8), en un trabajo de colaboración con la maestra Araceli Peralta Flores, investigadora de la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos.



Figura 8. Modelado en Blender de los 10 retablos de la Catedral de San Bernardino de Siena, Xochimilco, Ciudad de México, septiembre 2024. Crédito: Marisela González Quiroz, LIAD-CNMH. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Basado en la amplia experiencia de aplicación de tecnología adquirida en más de 15 años, uno de los estudios integrales más recientes realizados es el levantamiento arquitectónico del templo y antiguo convento agustino de los Santos Reyes en Metztitlán, Hidalgo, en particular al templo, atrio, cubiertas y, de forma parcial, el claustro. El levantamiento fue realizado en junio de 2024, donde se alternaron distintas tecnologías, no solamente aplicadas al inmueble histórico, como fue el LiDAR TLS, ya que los estudios previos realizados en la década de los noventa indican que ha sufrido afectaciones estructurales por el hundimiento del terreno en la zona nororiente. Para corroborar la existencia de los desplazamientos en cualquiera de los sentidos X, Y o Z, se realizó un estudio topográfico con el establecimiento de 18 puntos de control terrestres con el sistema GNSS alrededor del conjunto conventual, colocando clavos de concreto en los pavimentos pétreos con una nomenclatura institucional pintada en rojo y, en los casos del terreno natural, una serie de estacas de madera de 35 a 40 centímetros, en promedio. Para determinar algún desplazamiento en cualquier sentido, debemos esperar un periodo determinado de tiempo para realizar un segundo levantamiento topográfico de las mismas características sobre los puntos conocidos, así como continuar con el levantamiento arquitectónico, lo que permitirá llevar un control y registro puntual de cada uno de los espacios y elementos arquitectónicos.



Figura 9. Fachada y cruz atrial del templo y antiguo convento agustino de los Santos Reyes, Metztitlán, Hidalgo, junio de 2024. Crédito: Ángel Mora Flores, LIAD-CNMH. Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFSMZAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.

Por otra parte, la tecnología de escaneo por luz estructurada utiliza patrones codificados de luz proyectados sobre los objetos para capturar su forma, color y textura, siendo otra posibilidad de registro, como las anteriormente descritas. Estos patrones son enviados a manera de franjas o líneas de luz led y de manera conjunta con las cámaras del equipo, reconstruyen la geometría del objeto con una precisión de 200 micras. Sin embargo, esta tecnología está limitada en su aplicación a superficies no mayores a 1.00 m^2; lo anterior debe entenderse si consideramos la suma de las superficies de las distintas vistas que podría tener el objeto en estudio, ya que el alto grado de detalle y densidad de polígonos para generar un sólido digital, demandan un alto procesamiento de datos tridimensionales. No obstante, gracias a esta técnica implementada en el LIAD

a partir del financiamiento otorgado por el Conacyt en 2014, se han realizado 119 procesos de documentación tridimensional, mayormente en el estudio de metales. Una parte de este acervo lo integran 70 objetos de la colección del Museo Virtual de Arqueología Subacuática (MAS) (Trejo, 2018) y para mejor referencia se puede consultar el artículo de la presente publicación del doctor Roberto Junco Sánchez.

Futuro, documentación tridimensional del patrimonio cultural mexicano

Las tres líneas de acción en las que se enfocará el LIAD se basan, principalmente, en las necesidades propias de la CNMH y las áreas sustantivas que la conforman, en particular las que derivan de la Dirección de Apoyo Técnico y la Subdirección de Supervisión de Proyectos y Obras Externas. Esto con el objetivo de dar atención al patrimonio histórico inmueble que se encuentre en proceso de restauración, para elaborar estudios geométricos de alta precisión mediante planimetrías y altimetrías. Mismas que a partir de noviembre de 2024, se integraron al Sistema de Publicación y Administración del Catálogo Nacional de Monumentos Históricos Inmuebles, iniciando por los levantamientos arquitectónicos realizados en la Ciudad de México. Cabe destacar que se continuará dando atención cuando así se requiera, previa evaluación del estudio, a las distintas solicitudes emitidas por diferentes unidades administrativas del INAH, principalmente las provenientes de los museos nacionales y los Centros INAH, así como a las elaboradas por los responsables de inmuebles eclesiásticos y mayordomías encargadas de la administración y cuidado de los bienes.

Impulsar las políticas federales en materia de tecnologías de la información y la comunicación (TIC), como lo establece el artículo 6º de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que obliga al Estado a garantizar el derecho de acceso a la información. En el mismo sentido a lo establecido por la Coordinación de Estrategia Digital Nacional, área especializada del gobierno federal, responsable del acuerdo de Estrategia Digital Nacional dirigida a impulsar las acciones encaminadas a la adopción de políticas públicas tecnológicamente viables y congruentes con sus objetivos específicos, señalando que la política social digital es una garantía del derecho a la información, y de acceso a las TIC. Para ello es importante mencionar el seminario "Compartiendo experiencias de divulgación del patrimonio cultural mediante herramientas de representación visual digital", creado e impulsado por el doctor Manuel Gándara Vázquez y la maestra Teresa Menchelli Pérez, con el objetivo de crear una metodología donde confluyan la tecnología y las estrategias de comunicación (INAH, 2024), donde el LIAD ha tenido una participación constante desde 2023.

Lo anterior, además de fortalecer las capacidades técnicas del personal técnico del LIAD, así como de las tecnologías utilizadas para su actualización y renovación, mediante la participación en las convocatorias emitidas por el Conahcyt y organismos nacionales e internacionales, como el expediente ingresado a inicios de 2025 en la Unión Europea, bajo el programa Innovation and Architectural Heritage for Advancements in Sustainable Learning, Capacity Building and Research between Europe and Latin America (INNOVARCH), en colaboración con instituciones académicas de Italia, Brasil,

España y México por conducto de la UNAM, la Universidad de Guanajuato y la CNMH del INAH como socio institucional y coordinado por la Universidad de Florencia, Italia (Università degli Studi di Firenze).

Conclusiones

Los objetos culturales son producto de la sociedad que representan algo significativo de carácter estético, utilitario, o algún otro fin propuesto por el mismo hombre, ya sean intangibles o tangibles, como los artefactos, herramientas, el patrimonio arqueológico, histórico o artístico. Para ello es indispensable su registro de manera puntual, ya sea mediante su identificación en una ficha de campo, fotografías, dibujos o diversas tecnologías, como se expuso a lo largo del presente artículo. Todo lo manifestado es el resultado de más de 15 años de trabajo ininterrumpidos gracias al apoyo institucional y al entusiasmo incansable de todos los colaboradores que, en algún momento, formaron parte del Laboratorio de Imagen y Análisis Dimensional, el cual ha sido posible mostrar durante este Encuentro México y Francia, Innovación y uso de tecnología en la conservación del patrimonio cultural.

"Sólo se conserva lo que se aprecia y sólo se aprecia lo que se entiende"
Freeman Tilden, 1957

Fuentes de información

Cultura, S.d. (10/03/2024). "Museo Regional de Puebla prepara exhibición sobre la misión arqueológica mexicana en Egipto", en *https://www.gob.mx/cultura/prensa/museo-regional-de-puebla-prepara-exhibicion-sobre-la-mision-arqueologica-mexicana-en-egipto?idiom=es-MX*

Gómez, S., & Gazzola, J. (2018). *El uso del escáner láser 3D como parte del procedimiento heurístico para la exploración del túnel bajo el Templo de la Serpiente Emplumada en Teotihuacan*. En V. Valero, J. Ramírez, & Á. Mora, Tecnología 3D por barrido láser aplicado al estudio, protección, conservación, restauración y difusión del patrimonio cultural edificado (pp. 55-73). Publicaciones Digitales ENCRyM, Instituto Nacional de Antropología e Historia. Ciudad de México.

Herráez, J., Navarro, P., Denia, J. L., Mora, Á., García, J. C., & Combeller, H. (2010). *Implementación de nuevos métodos de documentación y registro fotogramétrico digital para la protección y puesta en valor del patrimonio monumental mexicano*. Instituto Nacional de Antropología e Historia. Ciudad de México.

INAH (Enero/2024). *Compartiendo experiencias de divulgación del patrimonio cultural mediante herramientas de representación visual digital*. Obtenido de Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía, en *https://investigacion.inah.gob.mx/node/9061*

Michoacán, C.I. (08/12/2021). *Redes de Occidente*. Obtenido de Recuperación del Templo de Santiago Apóstol Comunidad Indígena de Nurio, en *https://revistas.inah.gob.mx/index.php/redesdeoccidente/article/view/17427/18686*

Trejo, F.D. (18/05/2018). Publicaciones digitales ENCRyM. Obtenido de "Generación de modelos tridimensionales de piezas arqueológicas para el museo virtual de arqueología subacuática", en *https://revistas.inah.gob.mx/index.php/digitales/article/view/11990*



Crédito: CICM-imagen en evento. Esta página

Clausura

Para mayor detalle escanea el código QR y podrás ver la transmisión completa de esta sección del Encuentro México y Francia

Quiero compartirles que del Encuentro México y Francia. Innovación y uso de tecnología en la conservación del patrimonio cultural, me estoy llevando una gran satisfacción y alegría por haber presenciado las extraordinarias conferencias que se impartieron en esta inigualable sede, el Auditorio Jaime Torres Bodet del Museo Nacional de Antropología, por parte de profesionistas de primer nivel. Realmente me siento muy complacida y agradecida por el resultado de este encuentro académico que seguramente está abriendo nuevas puertas para el fortalecimiento de la cooperación científica y académica internacional, así como al interior de nuestro propio país en torno de un tema que nos apasiona y nos une: el patrimonio cultural y, en particular, al uso de la tecnología en su conservación.

El Encuentro México y Francia nos deja nuevos conocimientos y diversas reflexiones. En todas las participaciones, los ponentes subrayaron la necesidad de estudiar el patrimonio cultural mediante procesos metodológicos integrales, basados en el trabajo de un equipo interdisciplinario. Las tecnologías y la innovación han fortalecido las tareas de restauración, investigación, protección y difusión así como el acceso global al patrimonio cultural. Sin duda, facilitan la labor de investigadores y conservadores, ofrecen precisión y, en muchos casos, también rapidez. Aún así, cabe destacar que la labor de los especialistas es imprescindible para lograr la correcta selección e interpretación de los datos obtenidos. La tecnología y la inteligencia artificial no han logrado aún, por fortuna, sustituir el trabajo humano en cuanto al análisis, diagnóstico y propuesta de soluciones, pero ciertamente contribuyen a la eficacia, eficiencia, obtención y resguardo de una gran cantidad de datos digitales, para la toma de mejores decisiones.

Indudablemente, el camino andado por diversas instituciones y especialistas se ve enriquecido con encuentros de este tipo, en los que se evidencian los avances en la materia pero también los desafíos inmediatos y a futuro. En México, por ejemplo, uno de los mayores retos es lograr la descentralización del acceso a las tecnologías, asegurando que investigadores y conservadores en todas las regiones del país cuenten con la tecnología necesaria para desarrollar su quehacer. Otra tarea no menor es llevar a cabo capacitaciones continuas, al ritmo del vertiginoso avance de la tecnología. Las instituciones y los especialistas debemos estar a la par de las transformaciones tecnológicas a través de una constante actualización. Por tanto, debemos fomentar las colaboraciones interinstitucionales, interdisciplinarias e internacionales, para seguir compartiendo innovaciones y proyectos colaborativos. Otro gran desafío, al menos para los que nos dedi-

camos específicamente a la restauración del patrimonio cultural, es lograr la armonía entre los métodos tradicionales y las tecnologías recientes, alcanzar el equilibrio entre lo antiguo y lo contemporáneo.

No puedo dejar pasar esta oportunidad para extender nuestro mayor agradecimiento a las personas que colaboraron en este encuentro, que se involucraron de lleno, que dedicaron días, noches y, realmente, pusieron todo su interés y energía para que el Encuentro México y Francia tuviera éxito, y me parece que se logró. Muchas gracias a Luis Rojas, motor y coordinador general de este foro. Por supuesto, agradecemos al Ministerio de Cultura en Francia, ahora representado por Pascal Liévaux con quien estamos profundamente agradecidos por haber sido, además de un ponente extraordinario, un interlocutor con algunos de los ponentes que tuvimos oportunidad de escuchar. Asimismo, agradezco el apoyo fundamental de la Embajada de Francia en México, en particular, a Emmanuel Eveno; así como a Mauricio Jessurun, Moisés Juárez, Salvador Fernández, Ángel Barajas y a todo un equipo del Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM), quienes creyeron desde el inicio en este proyecto. Del Colegio de Ingenieros Civiles de Puebla (CICEPAC), agradezco a Enrique García Fuentes, por habernos convocado para aquella primera iniciativa que fue la que nos unió. Esperamos seguir caminando todos juntos en el tema del patrimonio cultural. Agradezco también la participación de la Asociación Alumni México Francia, por medio de Juan Rodríguez, su presidente; así como de la Universidad Cergy París, a través de Beatriz Menéndez, quien ha sido una incanzable aliada y puente entre ambos países. Agradezco, por supuesto al equipo de la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos del INAH, en particular, a Ángel Mora y a Miriam Velázquez quienes colaboraron a sol y sombra para el logro de este encuentro binacional.

Damos las gracias a los ponentes, mexicanos y franceses, moderadores y secretarios, a quienes se desplazaron para estar con nosotros, al igual que a quienes de manera remota se conectaron, desvelándose en algunos casos, para participar en este encuentro. Estamos sumamente agradecidos con todas y todos ustedes. Quisiera hacer una mención especial al equipo de INAH TV, Ana Galicia, Enrique Martínez y a todo el equipo de grabación y transmisión que estuvieron trás las cámaras estos días; a la Dirección de Medios de Comunicación, a Ulises Leyva, Arturo Méndez y, por supuesto, a la Coordinadora Nacional de Difusión del INAH que encabeza estas áreas, nuestra querida Beatriz Quintanar. También al Museo Nacional de Antropología que nos acogió y nos dio ciertas concesiones para poder disfrutar de este encuentro, mediante su director, Antonio Saborit, así como a Jorge Rubalcaba, Carla Ramírez y a todo el equipo. Una mención afectuosa para Patricia Rubalcaba, quien estuvo detrás de la organización; al equipo de traducción por su excelente labor, muchísimas gracias por hacer accesible a todo el público, cada exposición. No quisiera cerrar sin dar un agradecimiento muy especial al Club de Estudiantes del Colegio de Ingenieros Civiles de México, que nos apoyó en muy diversas actividades. No me queda más que reiterarles nuestro agradecimiento a todos los asistentes y quedar a su disposición desde la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos del Instituto Nacional de Antropología e Historia.

Mtra. en Arq. Valeria Valero Pié

Me uno a estos agradecimientos porque todo este encuentro ha sido posible gracias al trabajo colaborativo de muchas personas. Somos quienes estamos aquí, frente a ustedes, pero en realidad estamos apoyados por innumerables personas que están también de manera presencial y virtual, así que me uno a todos y cada uno de estos agradecimientos. Quiero reconocer también que hemos sido privilegiados al tener dos días completos de conocimiento de alto nivel, hacernos conscientes de ello.

Que fuimos privilegiados de estar en un recinto tan magnífico como el Museo Nacional de Antropología, con especialistas en la materia, que nos brindaron generosamente sus conocimientos y que, además, nos permitieron imaginar nuevas vías de aprendizaje, de conocimiento, de difusión y de divulgación de la cultura. En este sentido, para cerrar esta participación, por parte de la Asociación Alumni México Francia quiero reconocer particularmente, y no me cansaré de hacerlo, a su vicepresidente, Luis Rojas Nieto, quien nos convocó a todos para este evento.

Cabe recordar que esta asociación vincula a México y a Francia a través del conocimiento, y queremos seguir aportando para ambos países. Así, con este primer encuentro donde participamos como asociación, inicia una serie de actividades que tendremos, por lo cual les pido que sigan nuestras redes, nuestras comunicaciones, porque estaremos generando más eventos de este tipo. No me resta más que decirles gracias también a ustedes, por este tiempo dedicado, este tiempo entregado, y que todo sea bueno en este contexto, en las relaciones entre México y Francia.

Gracias.

Mtro. Juan Antonio Rodríguez Hernández

Creo que la palabra clave del Encuentro México y Francia fue la conservación. Y aquí voy a hacer rápidamente una descripción de lo que es un ciclo de vida de un proyecto: arrancamos con los trazos preliminares, analizamos las factibilidades donde se vea un proyecto viable y luego pasamos a la etapa de diseño, donde hay muchísimos estudios que se tienen que realizar para cualquier proyecto de infraestructura. Una vez que se tiene el diseño completo, pasamos a la construcción, y después a la puesta en marcha y operación. Al respecto, la última etapa del ciclo es la conservación, que tanta falta nos hace en muchas obras de este país.

Entonces, quiero hacer énfasis en la palabra clave del encuentro, decirles que los ingenieros civiles debemos estar muy involucrados con la responsabilidad social y muy conscientes de que el trabajo que hacemos, si no sirve para aumentar la calidad de vida de la gente, no lo estamos haciendo de la manera adecuada.

Vayamos con esa reflexión y trabajemos juntos por los motivos que coadyuven a la conservación del patrimonio de nuestras grandes naciones.

Mtro. Mauricio Jessurun Solomou

Muchas gracias a todos. Fui presidente del Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Puebla (CICEPAC) hasta el día 31 de enero (de 2025), y hoy estoy muy agradecido de participar en esta mesa para cumplir con una de las obligaciones básicas de los colegios de profesionistas, que es la divulgación del conocimiento. Ésa es la función principal de los colegios de profesionistas, que quienes están en la práctica estén equiparados en el conocimiento con quienes están recientemente saliendo de las universidades. Ésta es la función y aquí se cumple. Muchísimas gracias por la invitación al CICEPAC por parte de la maestra Valeria Valero, por parte de Luis Rojas, del ingeniero Mauricio Jessurun; para nosotros ha sido un honor compartir este espacio.

Soy un defensor de la profesión, de la ingeniería civil, y me sorprende que no participen más ingenieros civiles en la conservación del patrimonio. Sin embargo, debo aceptar que no porque se tengan muchos ingenieros civiles, se lograrán resolver los problemas de conservación del patrimonio. Considero que todo debe orientarse hacia un trabajo en conjunto con el uso de las nuevas tecnologías, de manera unificada y con metodología, mediante la aplicación del método científico, como lo aprendemos los ingenieros, con el objetivo de conservar el patrimonio cultural. Y ello aplica a todo lo hecho por el CICEPAC, porque lo que nosotros hacemos se enfoca en la conservación del patrimonio edificado. Por tanto, valoramos la huella de quienes estuvieron antes que nosotros y es nuestra obligación preservarlo para el futuro; con esa elección me quedo.

Muchísimas gracias a todos.

M. en I. Enrique García Fuentes

Es un honor dirigirme a ustedes en la clausura de este Primer Encuentro México y Francia, Innovación y uso de la tecnología en la conservación del patrimonio cultural. Durante estos dos días, hemos sido testigos de un diálogo enriquecedor, donde el conocimiento, la experiencia y la pasión por la preservación de nuestra historia y cultura, han sido los protagonistas.

México y Francia comparten un profundo respeto por su patrimonio cultural, y este encuentro ha sido una muestra clara del interés mutuo por fortalecer la cooperación en su restauración, conservación, mantenimiento y valorización. A través de conferencias, mesas de diálogo y presentaciones de proyectos, hemos explorado modelos innovadores, intercambiado estrategias exitosas y analizado desafíos comunes en la preservación de los bienes culturales de nuestras naciones.

Hemos conocido proyectos relevantes que reflejan el compromiso de ambos países con la restauración arquitectónica, la aplicación de la ingeniería, la protección del arte y la transmisión de nuestras tradiciones a las futuras generaciones. También hemos destacado la importancia de la tecnología y de la investigación interdisciplinaria; así como la participación social en la conservación de nuestro patrimonio cultural, como uno de los temas más importantes.

Este encuentro no solo ha sido un espacio de aprendizaje, sino también de construcción de alianzas, como las establecidas con el Ministerio de Cultura de Francia, con la Embajada de Francia y con la Universidad Cergy. Hoy, más que nunca, la colaboración internacional es clave para garantizar que nuestro legado perdure en el tiempo. La restauración del patrimonio no solo es una labor técnica, es también un compromiso con nuestra identidad, nuestra historia y nuestro futuro.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas y todos los participantes, ponentes, organizadores, estudiantes, empresas patrocinadoras, personal del Instituto Nacional de Antropología e Historia, del Museo Nacional de Antropología, y de la Embajada de Francia, que hicieron posible este evento. Su entusiasmo y dedicación fueron fundamentales para el éxito de este primer Encuentro México y Francia, con la posibilidad futura de una segunda reunión.

La numeralia del evento fue de 20 reuniones del comité, 3 mil chats, 500 correos, 55 panelistas, siete mesas; 29 conferencias, ocho en francés y 21 en español; 19 estudiantes, ocho personas en cabina, 7 mil 280 visualizaciones y 82 mil 802 interacciones en la plataforma Zoom.



El encuentro fue visto en los estados de Michoacán, Aguascalientes, Campeche, Guerrero, Yucatán, Puebla, Ciudad de México, entre otros, así como en Francia, Nicaragua, Argentina, El Salvador y otros países.

Cerramos este capítulo con la certeza de que hemos sentado las bases para futuras colaboraciones. Que éste sea el inicio de una relación más estrecha entre México y Francia en la preservación de lo que nos define como pueblos y nos une como humanidad.

Agradezco a todos, a todas las personas presentes y virtuales de este gran encuentro México Francia, y declaramos cerrados los trabajos del primer Encuentro México y Francia, Innovación y uso de la tecnología en la conservación del patrimonio cultural.

Nos vemos en el próximo.

Gracias, hasta pronto.

Merci et à bientôt.

Mtro. Luis Rojas Nieto

Crédito: CICM-imagen en evento. Esta página

Semblanzas

(Orden de aparición)

Valeria Valero Pié se graduó de la Licenciatura de Arquitectura con mención al mérito por la UNAM, y realizó el Posgrado en Historia, análisis y evaluación de los bienes arquitectónicos y ambientales, en el Politécnico de Turín, Italia, obteniendo el título de especialista con mención honorífica. Ha colaborado en el desarrollo de proyectos y obras de restauración en distintos despachos, y desde 2007 en la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos (CNMH) del INAH. De 2012 a 2019 se desempeñó como Directora de Apoyo Técnico en la CNMH. En febrero de 2019 fue nombrada Coordinadora Nacional de Monumentos Históricos del INAH, cargo que desempeña hasta la fecha. Ha organizado y participado en diversos encuentros académicos en México y en el extranjero, además de ser autora de varias publicaciones académicas. Es Consejera Titular del INAH para el Consejo de Monumentos Históricos Inmuebles, el Consejo de Conservación-Restauración de Monumentos Muebles y Muebles Asociados a Inmuebles Competencia del INAH, el Consejo General Consultivo del INAH, así como el Consejo de Área de Conservación y Restauración de Bienes Culturales.

Blanca Jiménez Cisneros fue nombrada Embajadora de México en Francia el 30 de agosto de 2021. Cuenta con una amplia experiencia como funcionaria pública e investigadora, particularmente en las áreas de ingeniería ambiental, gestión del agua, cambio climático y diplomacia científica. Es ingeniera ambiental (1980) con Maestría en Control de la Contaminación (1982), un Doctorado (1985, *Summa cum laude*) y un Posdoctorado en Tratamiento de Agua Residual y Reúso. En sus 35 años de experiencia ha ocupado puestos directivos en instituciones públicas y universidades, entre ellos, la Dirección General de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), de 2018 a 2021. Es investigadora en la UNAM y la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). En el ámbito internacional, residió un año en Sudáfrica atendiendo proyectos de agua y alimentación en la Universidad de Pretoria, en colaboración con la UNAM, y fue directora de la División de Ciencias de Agua para la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). Desde 2004 es miembro del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), del cual ha sido autora, coordinadora y revisora en temas de agua, ciudades, América del Norte y la relación agua-energía-alimentos y ambiente. Ha recibido el Reconocimiento Nacional de Ingeniería Ambiental (2016), el Global Water Award (2010), el Premio Nacional de Ciencias y Artes (2009), la Medalla "Heberto Castillo" en Medio Ambiente (2008), el Premio Universidad Nacional en Desarrollo Tecnológico (2008), el Premio Nobel de la Paz (2007, como parte del IPCC), la Medalla al Mérito Universitario por la Universidad Veracruzana (2006), el Premio Nacional de Ecología (2006), la Royal Polar Star (2002, otorgada por Carl XVI Gustaf, rey de Suecia) y el Premio de Ecología y Medio Ambiente de la Fundación Miguel Alemán Valdés (2001), entre otros.

Víctor Rodríguez Padilla, actual director general de Petróleos Mexicanos (Pemex), se graduó como físico en la UNAM, donde también cursó la Maestría en Ingeniería Energética. Obtuvo su Doctorado en Economía de la Energía por la Universidad de Grenoble, además de Posdoctorados en el Instituto de Economía y Política de la Energía, en Francia, y en el Instituto Nacional de la Investigación Científica, en Quebec, Canadá. Es profesor del Posgrado de Ingeniería de la UNAM y miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI). En su trayectoria de 42 años en el sector energético, fue asesor en el Senado de la República, la Cámara de Diputados, la Auditoría Superior de la Federación (ASF), el Consejo de la Judicatura, la Suprema Corte de Justicia de la Nación (SCJN) y otras dependencias gubernamentales. Es uno de los especialistas que más conoce del sector energético mexicano, férreo defensor de las empresas energéticas de la nación y de la soberanía energética; autor y coautor de textos académicos, artículos de opinión y libros sobre diversos aspectos relacionados con temas energéticos y fuentes de energía renovable, además de análisis políticos, económicos y sociales. Recibió el Premio Nacional de Investigación Económica "Jesús Silva Herzog" y la Medalla "Gabino Barreda", que otorga la UNAM, y ha impartido las Cátedras Especiales "Mariano Hernández Barrenechea" y "Odón de Buen".

Pascal Liévaux, doctor en Historia del Arte y licenciado en Derecho, ocupa la jefatura de la Delegación de Inspección, Investigación e Innovación de la Dirección General de Patrimonio del Ministerio de Cultura de Francia. Como parte de sus funciones, contribuye a la estructuración de las ciencias del patrimonio, asociando a investigadores académicos y profesionales en proyectos conjuntos y difundiendo los resultados de esta investigación en la publicación en línea *In Situ, Revue des Patrimoines*, de la que es

redactor en jefe en Europa, a través de la Iniciativa de Programación Conjunta sobre Patrimonio Cultural (JPI-CH), de la que es presidente desde 2018. También representa al Ministerio de Cultura francés en el proyecto europeo E-RIHS, coordinado por Italia, cuyo objetivo es establecer una infraestructura distribuida para el análisis de materiales patrimoniales, además de presidir el comité directivo de E-RIHS Francia. Es el representante francés ante la Comisión Europea en el Comité de Programa del Clúster 2 de Horizonte Europa, donde está involucrado en la preparación de la Asociación del Patrimonio Cultural Resiliente, apoyada por la Comisión Europea, que reúne a más de 20 países para financiar la investigación sobre el patrimonio cultural frente al cambio climático durante un periodo de siete años.

Delphine Borione, Embajadora de Francia en México, es egresada de la ex Escuela Nacional de Administración, hoy Instituto Nacional del Servicio Público, de Francia (ENA-INSP). Diplomada por el Instituto de Ciencias Políticas de París (Sciences Po) en Derecho e Historia de las Relaciones Internacionales, cuenta con 35 años de experiencia diplomática en los cuales ha ocupado diversos cargos en el Ministerio para Europa y de Asuntos Exteriores, fue Embajadora para los Derechos Humanos (2021-2024), Representante Permanente de Francia ante la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el Programa Mundial de Alimentos (PMA) y el Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola (FIDA), con sede en Roma, Italia, en los años 2017-2020; directora de la Política Cultural y del Francés (2009-2013); Embajadora de Francia en Kosovo (2008-2009); consejera cultural en la Embajada de Francia en Italia (2003-2006), y encargada de las negociaciones sobre el cambio climático y la Conferencia de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (1989-1993). Se desempeñó como consejera para Asuntos Multilaterales en el gabinete diplomático francés (2006-2007) y se encargó de la preparación del G8 de 2003 bajo la presidencia francesa (2002-2003). Asimismo, fue secretaria General Adjunta de la Unión por el Mediterráneo, en Barcelona, España (2013-2017); consejera en el Programa Mundial de Alimentos de las Naciones Unidas (1993-2000), y Consejera en la Misión de las Naciones Unidas en Kosovo-MINUK (1999). Fue condecorada con la Orden de la Legión de Honor en grado de Oficial y con la Orden del Mérito Agrícola en grado de Comendador. La Embajadora de Francia en México, Delphine Borione, asumió sus funciones en México el 29 de abril de 2024.

Diego Prieto Hernández, antropólogo social, egresado de la Escuela Nacional de Antropología e Historia (ENAH), con Maestría en Ciencias Antropológicas por la UAM-Iztapalapa, y estudios de Maestría en Ciencia Política por la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Desde enero de 2017 es director general del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). Entre 2015 y 2016 fue secretario técnico y encargado de la Dirección General de dicha Institución, además de coordinador Nacional de Antropología y director del Centro INAH Querétaro. Fue profesor investigador del INAH y de la Universidad Autónoma de Querétaro. En 2016 presidió el Colegio de Etnólogos y Antropólogos Sociales, AC. Cuenta con un centenar de publicaciones en revistas especializadas y libros, como autor, coautor, coordinador y editor, que reflejan su vocación sobre los temas más cercanos a la antropología y sus ciencias afines.

José Luis Perea González es maestro en Políticas Culturales y Desarrollo por la Universidad de Girona, España, con Posgrado en Educación de Adultos por la Universidad Pedagógica Nacional (UPN), y antropólogo social por la Escuela Nacional de Antropología e Historia (ENAH). Su experiencia profesional la ha desarrollado en el INAH como jefe de los departamentos de Museos Comunitarios y Proyectos Museológicos en la Coordinación Nacional de Museos y Exposiciones. Fue director de Operación de Sitios y Planes de Manejo, así como director de la Zona Arqueológica de El Tajín. Ocupó el cargo de director de los Centros INAH en los estados de Chihuahua, Zacatecas, Sonora, y actualmente funge como secretario técnico del INAH. Es miembro fundador del Programa Internacional de Investigación, Conservación y Difusión del Patrimonio Cultural "Camino Real de Tierra Adentro", hoy Itinerario Cultural de la UNESCO, así como miembro fundador del Seminario Internacional de Arquitectura de Tierra. Colaboró con el gobierno del estado de Chihuahua en la construcción de la Ley de Patrimonio Cultural estatal de 1999, y dirigió la integración del Plan de Manejo de la Zona Arqueológica de El Tajín en 2008. Fue asesor en patrimonio cultural para el Centro de las Artes Indígenas del estado de Veracruz y la Secretaría de Cultura de la Ciudad de México, además de profesor en el Instituto de Investigaciones Dr. José María Luis Mora y ha participado en diversas publicaciones nacionales e internacionales.

Luis Rojas Nieto es ingeniero civil por el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) y diplomado en Administración de Proyectos por parte del Instituto Superior del Concreto Armado y Presforzado (ISBA) de Francia. Es vicepresidente de la Asociación Alumni México Francia. Fue presidente del XXXVIII Consejo Directivo del Colegio de Ingenieros Civiles (CICM), asesor de la Asociación de Secretarios de Desarrollo Urbano de México (REDSEDUM 2022), presidente del Comité Asesor de Ingeniería Civil del ITESM y presidente de la Comisión de Ingeniería de la Dirección General de Profesiones, además de ser miembro de varios Comités Técnicos Nacionales de Infraestructura. También presidió la Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres, AC (AMIVTAC), fue secretario hispanoparlante del Comité de Puentes 4.3 de la Asociación Mundial de la Carretera 2017-2021 (PIARC) y es miembro del Comité Técnico 4.2 de Puentes 2023-2027. Se desempeño como ingeniero de proyectos SEEE (1987-1990), gerente de Ingeniería de Euro Estudios (1992-2002), director de Construcción (2002-2007) y del 2007-2021 director general de Freyssinet de México/Tierra Armada, además de fungir como asesor de empresas de ingeniería y ser consejero técnico de Euro Estudios desde 2021. Ha impartido cátedras en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador; en la FES Aragón de la UNAM, así como conferencias, cursos de capacitación y actualización en universidades y asociaciones técnicas, tanto en México como en el extranjero.

Isabelle Chave, egresada de la Escuela Nacional des Chartes, del Instituto Nacional de Patrimonio y de la Escuela Práctica de Altos Estudios, fue inicialmente directora adjunta de los archivos departamentales de la Somme (2001), después directora de los archivos departamentales y conservadora de las antigüedades y objetos de arte de los Vosgos (2004). En 2011, en el Archivo Nacional, fue nombrada responsable de la obra Desmaterialización y después jefa del Departamento Ejecutivo y Legislativo. En 2017 se unió a la administración central del Ministerio de Cultura como jefa adjunta del Departamento de Investigación y Gestión de Políticas Científicas, luego jefa de la Oficina de Conservación del Patrimonio Mobiliario e Instrumental y desde octubre de 2021 es subdirectora de Monumentos Históricos y Sitios Patrimoniales en la Dirección General de Patrimonios y Arquitectura.

Enrique García Fuentes es ingeniero civil, maestro en Ingeniería Estructural por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), corresponsable en Seguridad Estructural, perito en Estructuras. Fue fundador y director general de Grupo Constructor Metálika, SA de CV, de +Ingenio Ingeniería Civil, SA de CV, y de GALAPE Inmuebles, SA de CV, empresas dedicadas al diseño estructural profesional, a la construcción en acero, obra civil y al desarrollo inmobiliario. En su trayectoria tiene más de 300 proyectos estructurales realizados y más de 200 obras ejecutadas en México y el extranjero. Participó en el diseño y construcción de inmuebles como el Centro de Convenciones Puebla, Outlet Puebla, Centro Comercial Centro Sur, Centro de Tecnología de Telmex, Plaza Inn, Cruz Roja Puebla, además de estacionamientos, hoteles, plazas comerciales y edificios prefabricados de estructura metálica. Se ha desempeñado como diseñador y gerente de proyecto en Grupo FEMSA en México y Venezuela, de CN en Ecuador, de Heineken, VW de México, Edificio ORGANIKA en la ciudad de Puebla, entre otras. Fue presidente de los XXVII y XXVIII Consejos Directivos del Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Puebla (CICEPAC) de 2021 a 2025, miembro del Comité de Admisión de Corresponsables en Seguridad Estructural del CAADROC de 2018 a la fecha, vicepresidente de Dictámenes y Peritajes del Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Puebla (CICEPAC) de 2015 a 2019, además de catedrático en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) y en la Escuela de Ingeniería de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP).

Miguel Alejandro Muñoz Muratalla es ingeniero civil egresado de la UPAEP, graduado de la Maestría en Estructuras de la BUAP, y en Administración de la Construcción por el Instituto Tecnológico de la Construcción, sede Puebla, así como un Doctorado en Dirección de Organizaciones por la UPAEP. Obtuvo el Premio "Abelardo Sánchez Gutiérrez" como el mejor estudiante de su generación y el Premio ANFEI como uno de los mejores egresados en Ingeniería de México. Fue director de múltiples proyectos de desarrollo y comercialización de vivienda de 2003 a 2008 en la inmobiliaria Casas GEO Puebla. Su amplia trayectoria profesional abarca su colaboración en organismos de la construcción, como secretario del consejo directivo del CICEPAC XXIV-XXVI de 2015 a 2020, y de la AMPI, de la cual fue presidente de la Sección Puebla en 2023 y 2024. Actualmente es director general de SADAL Puebla, SA de RL, desde 2011, y de Constructora MUMRA, SA de CV, desde 2008; además de presidir el XXIX Consejo Directivo del Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Puebla (CICEPAC), AC.

Hugo Oswaldo Ferrer Toledo es ingeniero civil con la Maestría en Estructuras, egresado de la UPAEP. Doctor en Sismología por el Instituto de Geofísica de la UNAM, fue profesor en las áreas de Ingeniería Estructural e Ingeniería Geotécnica de las licenciaturas y maestrías de Ingeniería Civil y Arquitectura, de distintas universidades, además de dirigir trabajos de investigación y tesis para licenciatura y maestría en dichas áreas, y doctorales en Geofísica, Estructuras y Gestión de Riegos. Ha impartido cursos relacionados con los temas de riesgo sísmico y vulnerabilidad estructural en diferentes universidades de México, e instructor invitado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Es miembro de diferentes consejos editoriales de revistas y sociedades técnicas, como el de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural (SMIE). Es autor del libro *Efectos sísmicos de trayecto y de sitio para el centro de México*. *Un estudio de la influencia del Eje Volcánico Transmexicano a partir de registros de sismos fuertes*. Se desempeñó como Decano de Ingenierías de la UPAEP con 12 licenciaturas a su cargo, entre ellas Ingeniería Civil e Ingeniería Aeroespacial. Fue director Responsable de Obra en varios municipios del estado de Puebla y corresponsable en Seguridad Estructural en el municipio de San Andrés Cholula. Asimismo, fue revisor del capítulo "Diseño por Sismo" del *Manual de obras civiles 2015* de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), y coautor de diferentes mapas de riesgo sísmico para diferentes zonas de México, entre los que destacan el del Centro Histórico de la ciudad de Puebla, el de San Andrés Cholula y el del Istmo de Tehuantepec.

Damien Tamagnan, ingeniero topógrafo superior egresado del Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de Estrasburgo (INSA Strasbourg, por sus siglas en francés), Francia, en 2001. Inició su ejercicio profesional en 2001, participando en la construcción y el monitoreo del puente atirantado de Rion-Antirion, en Grecia. De 2004 a 2007 laboró en la empresa de ferrocarril francesa, encargado de la División de Patología de las Estructuras. En 2007 se integró a la empresa Sixense donde participó en numerosas obras de instrumentación en las áreas de túneles, carreteras, excavaciones, edificios históricos, presas, minería y puertos. Es conferencista, autor y coautor de varias publicaciones nacionales e internacionales en el ámbito de la instrumentación geotécnica y de estructuras. Desde 2016 se desempeña como director general de Sixense para México y América Latina.

Gabriel Auvinet se graduó de Ingeniero Civil en la Ecole Spéciale des Travaux Publics de París y de Doctor en Ingeniería en la Universidad Nacional Autónoma de México. Fue profesor invitado en las universidades de Grenoble, Nancy y Clermont Ferrand. Es Doctor *Honoris Causa* de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Ha dedicado su trabajo de investigación a cimentaciones en suelos blandos en zonas sísmicas y en presencia de hundimiento regional. Ha sido presidente de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos y Vicepresidente por Norte América de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos. Es miembro de la Academia de Ciencias y de la Academia Nacional de Ingeniería de México, miembro honorario del Seminario de Cultura Mexicana y miembro titular del Consejo de Monumentos Históricos del Instituto Nacional de Antropología e Historia.

Mariana López Mendoza es egresada de la Facultad de Arquitectura de la UNAM y de la Maestría en Arquitectura con especialidad en Restauración de Monumentos de la Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía (ENCRyM) "Manuel Castillo Negrete" del INAH. En 2004, a través de la Fundación Carolina, fue becada por el gobierno de España para realizar un programa formativo avanzado en conservación del patrimonio arquitectónico y urbano realizando, entre otras actividades, el Master en Restauración y Rehabilitación del Patrimonio en la Universidad de Alcalá de Henares (UAH), en Madrid. Su trabajo profesional lo ha desarrollado en la coordinación de proyectos y obras de restauración de orden público y privado, para la conservación del patrimonio histórico construido. Desde 2009 labora en el INAH, desde 2010 forma parte del grupo editorial fundador de la revista *Intervención* de la ENCRyM; en 2016 participó, entre otros proyectos, en la recuperación y conservación de la pintura mural del muro testero de la catedral de San Bernardino de Siena, en Xochimilco. En 2017 se integró a la Subdirección de Supervisión de Proyectos y Obras Externas de la CNMH, donde participó en la restauración de la escultura de Carlos IV y su pedestal por la que obtuvo el Premio INAH 2018 "Paul Coremans" en la categoría Trabajo de Conservación de Bienes Muebles al trabajo colectivo. Actualmente encabeza la Subdirección de Supervisión de Proyectos y Obras Externas de la CNMH, responsable de las obras y proyectos de intervención para la atención de los monumentos históricos afectados por los sismos de 2017 en la Ciudad de México, como parte del Programa Nacional de Reconstrucción.

Luc Ellermann, químico de formación con grado de doctor, es miembro experto del Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS), organización internacional no gubernamental asociada con la UNESCO, con 20 años en la Empresa para la Conservación del Patrimonio (ECP) e integrante del Grupo de Empresas del Monumento Histórico.

Antonio Mondragón Lugo es egresado de la Facultad de Arquitectura de la UNAM. Cursó estudios de posgrado en la Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía del INAH, institución donde participó en proyectos de relevancia nacional, como la restauración del antiguo convento de Santo Domingo de Guzmán, en la ciudad de Oaxaca, y en el Programa Emergente de Rehabilitación de Inmuebles Arqueológicos, Históricos y Artísticos afectados por los sismos de 1999, en el estado de Oaxaca. En la CNMH ocupó el cargo de subdirector de Supervisión de Proyectos y Obras Externas, y actualmente se desempeña como director de Apoyo Técnico, dirigiendo proyectos de intervención para el resarcimiento de los daños ocasionados por el sismo del 19 de septiembre de 2017.

Agustín Hernández Hernández es investigador del Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje de la Facultad de Arquitectura, de la UNAM. En 1993 se incorporó al proyecto de corrección geométrica de la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México, para colaborar en el desarrollo de las investigaciones encabezadas por el doctor Fernando López Carmona, dirigidas a salvaguardar el inmueble catedralicio. Asimismo, imparte dicha área de conocimiento en la Facultad de Arquitectura en la Especialización en Diseño de Cubiertas Ligeras, y en la Maestría de Restauración del Patrimonio Arquitectónico. Uno de sus más recientes proyectos realizados fue el apuntalamiento para contener la cúpula del santuario de Nuestra Señora de los Ángeles, en la Ciudad de México, mediante un hiperboloide de 21 metros de altura y una bóveda metálica de 23 metros de claro.

David Pineda Muñoz es arquitecto con experiencia en restauración de bienes inmuebles patrimoniales, especializado en metodologías de diagnóstico y coordinación interdisciplinaria. Ha participado en diversos proyectos con el INAH, así como con organismos internacionales.

Carlos Arce León es egresado de la Licenciatura en Ingeniería Civil de la FES Acatlán, de la UNAM. Realizó estudios en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM de 1987 a 1988. Graduado en Ingeniería Sísmica por el Instituto Internacional de Ingeniería Sísmica y Sismología de Japón (IISEE) en 1992, es diplomado en Análisis y Zonificación de Amenazas Naturales del Instituto Geográfico "Agustín Codazzi", de Bogotá, Colombia, en 1996. Es docente en la Licenciatura de Ingeniería Civil de la FES Acatlán desde 1983. Actualmente es jefe del Departamento de Análisis de Riesgos Naturales y Antropogénicos de la Unidad de Investigación Multidisciplinaria de la FES Acatlán. Ha participado con publicaciones en los congresos nacionales de Ingeniería Sísmica, en los de Ingeniería Estructural y en diferentes foros latinoamericanos de Ingeniería Civil. Es miembro de las sociedades técnicas de Ingeniería Estructural (SMIE) y de Ingeniería (SMI) en México y de la Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica (ACHISINA).

Hugo Hernández Barrios, ingeniero civil con Maestría y Doctorado en Ingeniería en el área de Estructuras, por la División de Estudios de Posgrado de la UNAM. Fue presidente del Colegio de Ingenieros Civiles de Michoacán de 2018 a 2020, director responsable de obra en Morelia, Michoacán, y evaluador del Programa Hospital Seguro. Miembro del Consejo de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica (SMIS) de 2017 a 2019 y de la mesa de la SMIS delegación Michoacán, de 2019 a 2021. Durante 17 años se desempeñó como profesor investigador de tiempo completo en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia; y como profesor en la licenciatura, maestría y doctorado, en la FES Acatlán, de la UNAM, durante 29 años. Ha publicado artículos en revistas, y participado en congresos nacionales y extranjeros, además de colaborar en la elaboración del *Manual de diseño de obras civiles por viento*, y del *Manual de diseño de obras civiles por sismo*, ambos de 2008, con el capítulo "Puentes

y sistemas de control". Fue asesor externo de Arcelor Mittal de 2018 a 2021. Cuenta con más de 29 años de experiencia en la práctica profesional.

Stefano Barone se graduó en Ingeniería de Terremotos y Sismología (2014-2016) por la IUSS-Scuola Universitaria Superiore Pavia MSc, en Ingeniería Civil-Estructural (2011-2014) por la Universitá di Pavia LM, y en Ingeniería Civil (2007-2012) por la Universitá di Catania LT. Entre sus primeras experiencias laborales está la empresa EUCENTRE, donde colaboró como ingeniero estructural en el Departamento de Escenarios de Riesgo, de abril de 2016 a abril de 2018, con la encomienda de evaluar la vulnerabilidad sísmica de puentes y edificios de concreto reforzado existente (análisis estático lineal, análisis de espectro de respuesta, análisis estático no lineal o *pushover* y análisis no lineal tiempo-histórico), además de analizar la respuesta experimental de dispositivos sísmicos basados en la fricción y estudiar la geometría y el daño de dispositivos en el sitio de puentes de concreto reforzado, en Italia. Posteriormente, se desempeñó como coordinador técnico de ventas para apoyos y dispositivos sísmicos en la empresa Freyssinet, también en Italia, donde se encargó de atender las ventas y aspectos técnicos en el centro global industrial de apoyos y dispositivos sísmicos, además de sus labores de ingeniero técnico de ventas. De mayo de 2018 a diciembre de 2019, trabajó como ingeniero diseñador e ingeniero de investigación y desarrollo. Desde enero de 2020 y hasta marzo de 2025 participó en la promoción, soporte comercial y técnico de los apoyos y dispositivos sísmicos en las diferentes unidades de negocios de más de 11 países, ante diseñadores, consultores y autoridades, encargándose también del diseño de estos dispositivos en la unidad de negocios, lo que le agregó valor a las ofertas gracias a sus propuestas alternativas, adiciones o mejoras expuestas a los clientes de Freyssinet.

Sergio Aguilar Sanders es ingeniero civil por la UNAM, cuenta con diplomados en Gerencia de Proyectos e Inteligencia Artificial Aplicada en los Negocios, y una especialidad en Comercio Exterior. Fue docente en la Universidad La Salle campus Cuernavaca. Ha impartido cursos en el Centro de Actualización Profesional e Innovación Tecnológica (CAPIT) del CICM, así como diversas presentaciones técnicas en instituciones de educación superior. Participó en la elaboración del libro *Retos y oportunidades de la Ingeniería Civil*, del CICM, además de la publicación de artículos en la Revista IC y de editoriales en el periódico *El Universal* versión digital. Desempeñó diversos cargos en el CICM de 2016 a 2024, incluyendo la organización de un Congreso. Fue presidente de la Asociación Nacional de Industriales del Presfuerzo y la Prefabricación, AC (ANIPPAC) de 2018 a 2020, así como socio de diversas asociaciones técnicas. Actualmente es director comercial de Freyssinet de México, SA de CV / Tierra Armada, SA de CV.

Manuel Villarruel Vázquez es arquitecto y maestro en restauración de sitios y monumentos, con una trayectoria de más de 25 años en la conservación del patrimonio cultural edificado. Su experiencia profesional abarca la planeación, gestión y ejecución de proyectos de restauración en monumentos históricos, así como el desarrollo de programas de investigación vinculados a organismos internacionales, como la UNESCO. Participó en la recuperación de importantes bienes patrimoniales, entre ellos el acueducto de Querétaro, las misiones franciscanas de la Sierra Gorda, las capillas familiares de Tolimán y el Real Colegio de Santa Rosa de Viterbo. Su labor ha sido fundamental en la documentación y protección del patrimonio cultural en diversas regiones de México. Desde 2005 forma parte de la primera misión de rescate y restauración de la Tumba Tebana de Puimra en Luxor, Egipto, un proyecto desarrollado en coordinación con el gobierno egipcio, la Sociedad Mexicana de Egiptología y la Universidad del Valle de México. Por su destacada trayectoria, en 2010 recibió el Premio INAH "Manuel Gamio" y una mención honorífica del Premio "Francisco de la Maza", otorgados por su contribución a la conservación del patrimonio cultural. En 2017 fue director de Licencias e Inspecciones de la CNMH del INAH, liderando la gestión de autorizaciones y la evaluación de proyectos en zonas de monumentos históricos, además de participar en la atención a los daños causados por los sismos de ese año. Actualmente, es director del Centro INAH Puebla, donde continúa su labor en la protección, restauración y difusión del patrimonio cultural de la región.

Juan Carlos García Salas, ingeniero civil por la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Obtuvo la Maestría en Ingeniería Urbana y el Doctorado en Ingeniería Civil con alta especialidad en obras hidráulicas, por el Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas en Lyon, Francia, además de la Maestría en Ingeniería Hidráulica por la UNAM y el Diplomado en Administración de Proyectos realizado en el ITESM. Inició su carrera profesional en 1993 como dibujante, analista y residente de obra, en diferentes empresas de la iniciativa privada y formó parte del programa de becarios del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Fue investigador titular del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), posteriormente tuvo a su cargo la Dirección Técnica del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM) de la CONAGUA. Desde hace 12 años es consultor experto en temas de gestión del agua, infraestructura hidráulica, energía y obras hidráulicas para vías terrestres. Actualmente es director general de Eta Intelly, empresa especializada en consultoría. Ha planeado, dirigido, y coordinado más de 90 estudios y proyectos de prefactibilidad, gran visión y proyectos ejecutivos. Fue profesor en varias universidades de México y de Francia. Es miembro del CICM, de la Academia de Ingeniería de México y de la Asociación Mexicana de Hidráulica (AMH). Es perito certificado en ingeniería hidráulica y miembro fundador de la Asociación Alumni México Francia, de la cual es secretario del I Consejo Directivo.

Livio de Luca, arquitecto, doctor en ingeniería, es director de Investigación en el Centro Nacional para la Investigación Científica (Centre National de la Recherche Scientifique, CNRS). Dirigió la Unidad Mixta de Modelos y Simulaciones para la Arquitectura y el Patrimonio (UMR CNRS/MC MAP), de 2012 a 2023. Fue nombrado miembro del Comité Nacional de Investigación Científica de 2016 a 2021, y en 2013 fue copresidente del Congreso Internacional UNESCO/IEEE/EG Digital Heritage en Marsella, y en Granada en

2015. Sus actividades de investigación en proyectos nacionales se centran en la topografía, el modelado geométrico y el enriquecimiento semántico de representaciones digitales de objetos patrimoniales, así como en el diseño y desarrollo de sistemas de información multidimensionales. Es editor del *Journal of Cultural Heritage* y editor asociado del *Journal on Computing and Cultural Heritage*, y de *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. En 2007 recibió el Premio Pierre Bézier de la Fundación Arts et Métiers, en 2016 obtuvo la Medalla de Investigación y Tecnología de la Academia de Arquitectura, en 2019 la Medalla a la Innovación del CNRS y en 2021 se le otorgó la "Targa d'Oro" de la Unione Italiana per il Disegno (UID). Desde 2019 es coordinador del grupo de trabajo Datos digitales del CNRS y del proyecto científico del Ministerio de Cultura para la restauración de la Catedral de Notre Dame de París. En 2022 ganó la beca ERC Advanced.

José Ortega Ramírez es ingeniero geólogo por el Instituto Politécnico Nacional (IPN), cuenta con doctorado y maestría por la Universidad Louis Pasteur de Estrasburgo, Francia. Su experiencia profesional la ha desarrollado en la geología del cuaternario y la investigación aplicada al estudio del patrimonio cultural tangible, por medio de técnicas geofísicas no invasivas. Actualmente es investigador, responsable del Laboratorio de Geofísica de la Subdirección de Laboratorios y Apoyo Académico (SLAA) del INAH. Ha publicado diversos artículos de sus trabajos y de divulgación científica, cuatro libros e igual número de capítulos de obras científicas, además de resúmenes de las memorias de congresos nacionales e internacionales. Ha sido invitado por sociedades e instituciones de investigación y docencia, como la Escuela y Observatorio de Ciencias de la Tierra (EOST) de la Universidad Louis Pasteur de Estrasburgo, Francia; así como de la Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE) de México, para llevar cabo trabajos de prospección geofísica sobre un mural de Juan O´-Gorman en Santiago de Chile, en 2018. Es miembro de comités tutoriales del Posgrado en Ciencias de la Tierra de la UNAM y el IPN, además de director de tesis externo de nueve estudiantes de las especialidades de Ingeniería Geológica, Ingeniería Geofísica, Ecología y Restauración. Fue dictaminador de artículos de revistas científicas nacionales e internacionales, y responsable del Proyecto Binacional México-Francia (CONACyT-CNRS) en 2011, 2013 y 2014.

José G. Huchim Herrera es egresado de la Licenciatura en Arqueología con la tesis *Introducción al estudio del sistema de aguadas de Uxmal, Yucatán*, con la cual obtuvo mención honorífica en el Premio "Alfonso Caso" del INAH, y realizó sus estudios de Maestría en Arquitectura en la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY). Es director del Proyecto Arqueológico Uxmal desde 1992, y a partir de 2009 dirige la Zona Arqueológica de Uxmal y la Ruta Puuc. Entre sus trabajos destaca la restauración arquitectónica de las zonas arqueológicas de Uxmal y Chichén Itzá, integrando a los pobladores de las comunidades mayas aledañas en los trabajos de restauración y conservación. Sus trabajos se han caracterizado por el uso de nuevas tecnologías para el registro del patrimonio arqueológico como el escáner láser, la fotogrametría y LiDAR (*Ligth Detection and Ranging*), resaltando el registro con escáner láser de los relieves del Juego de Pelota de Chichén Itzá en 2012, en conjunto con la Universidad Tecnológica Metropolitana de Mérida. También, desde 2017 se han realizado labores de registro con escáner láser en el Palacio del Gobernador, la Casa de las Tortugas y la estructura M8-12 de Uxmal, Yucatán, en el marco del Proyecto PROMETEO-MayaTech, en colaboración con la Universidad de Valencia y la Universidad Politécnica de Valencia, España.

Héctor Emmanuel Cauich Caamal, arqueólogo egresado de la UADY, ha trabajado en el análisis cerámico del sitio Salinas de los Nueve Cerros en Guatemala, salvamentos arqueológicos de la periferia de Mérida y material cerámico de la zona arqueológica de Uxmal. En 2019 se integró al equipo de la zona arqueológica de Uxmal y la Ruta Puuc, dirigido por el maestro José G. Huchim Herrera, en donde participa en la coordinación administrativa y operación de los sitios que la conforman. Se ha formado en técnicas de registro digital del patrimonio con diversos cursos, entre los que destacan fotogrametría, reconstrucción digital e impresión 3D y escáner láser. Actualmente, junto con el maestro José G. Huchim, encabezan el equipo de registro digital de Uxmal y la Ruta Puuc, en donde se emplea fotogrametría área y terrestre, LiDAR y escáner láser.

Roberto E. Junco Sánchez es arqueólogo por la ENAH, donde también estudió la Maestría y el Doctorado en Arqueología. Recibió el diploma de Arqueología Histórica de la Universidad de Leicester, Reino Unido. Actualmente es Affiliated Scholar del Institute of Nautical Archaeology, miembro de la Society for Histocial Archaeology e Institutional Member del ACUA. En 2017 se hizo cargo de la Subdirección de Arqueología Subacuática del INAH, en este último labora desde 2004. Entre los proyectos que ha dirigido se encuentran: Arqueología Subacuática en el Nevado de Toluca; Galeón de Manila, Baja California; Arqueología Marítima del Puerto de Acapulco y Arqueología Subacuática en la Villa Rica. Sus intereses académicos se centran en la arqueología del galeón de Manila y la navegación en la época colonial, expresiones prehispánicas de ritualidad en cuerpos de agua y la difusión del patrimonio cultural subacuático.

Moisés Juárez Camarena realizó sus estudios de Licenciatura y de Maestría en la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA) del IPN. Obtuvo el grado de Doctor en Ingeniería con especialidad en Geotecnia en la UNAM. Actualmente, colabora en el Laboratorio de Geoinformática de la Coordinación de Geotecnia del Instituto de Ingeniería de la UNAM, donde ha participado en más de 50 proyectos de investigación. Es profesor de asignatura de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIA del IPN, en el área de Geotecnia. Ha dirigido siete tesis de licenciatura y doce de maestría. De 2001 a 2002 fue profesor de la asignatura Laboratorio de mecánica de suelos, en el nivel licenciatura, en la FES Acatlán de la UNAM; y de 2004 a 2007 impartió la asignatura Geotecnia aplicada, de la Maestría en Geotecnia, en la Facultad de Ingeniería de la BUAP. Es editor de varias publicaciones de la SMIG. Cuenta con la certificación de perito profesional en geotec-

nia. Es miembro de la SMIG, donde fue presidente de 2019 a 2020, y actualmente es miembro del Consejo Consultivo y presidente del Comité Técnico de Caracterización Geotécnica de Ciudades y Regiones. También es miembro de la International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, del CICM, y actualmente es coordinador del Comité Técnico de Seguridad Estructural. Es parte del Subcomité Revisor de la Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Cimentaciones de la Ciudad de México, a cargo del Instituto para la Seguridad de las Construcciones, donde funge como secretario.

Norberto Domínguez Ramírez, ingeniero civil egresado de la ESIA del IPN, obtuvo la Maestría en Materiales e Integridad de las Estructuras en Situaciones Extremas (DEA-MAISE) y obtuvo el grado de doctor en Mecánica, Ingeniería Mecánica e Ingeniería Civil por la Escuela Normal Superior de París-Saclay (antes Cachan), de Francia. Laboró en empresas como ICA-Fluor Daniel, Alcatel y Nortel Networks de 1995 a 2000. De 2000 a 2005 colaboró en el Centro de Investigación Nuclear de Clamart de Electricidad de Francia (EDF), desarrollando *software* para el análisis estructural de centrales nucleares. Fue director de varios proyectos de investigación con fondos tanto nacionales como internacionales (SIP-IPN, Conacyt, Sedena, SECTEI, Fondo Newton de Gran Bretaña), además de supervisar más de 40 tesis de maestría y dos tesis de doctorado. Es miembro del comité editorial de Coupled Systems Mechanics (SCOPUS/ESCI indexed)-TechnoPress, Corea. Actualmente es investigador nivel 1 del SNI. Es fundador del Comité Institucional de Seguridad y Resiliencia del IPN (CISER-IPN), así como del Programa de Universidades Resilientes de la RED ECOS de la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECTEI) y la Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil (SGIRPC) de la Ciudad de México; es integrante de los comités de Resiliencia de la Infraestructura y Seguridad Estructural del CICM, y miembro invitado del Consejo de Resiliencia de la Ciudad de México. En el IPN fue coordinador de Operación y Redes de Investigación y Posgrado, en la Secretaría de Investigación y Posgrado; fue jefe de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIA, y desde 2024 es director de Investigación del Instituto.

Thomas Parent, diplomado de la Escuela Nacional Superior de Artes y Oficios, es actualmente profesor adscrito al Laboratorio I2M del Instituto de Mecánica e Ingeniería, del Departamento de Ingeniería Civil Construcción Sostenible del Instituto Tecnológico (IUT), perteneciente a la Universidad de Burdeos. Completó su doctorado sobre el desarrollo de una metodología para el diagnóstico de estructuras de mampostería antigua. Participó con el grupo de trabajo Estructuras, en el Taller Científico del Ministerio de Cultura/CNRS Notre Dame trabajando en la evaluación estructural de las bóvedas reforzadas de la catedral. Coordinó el proyecto ANR DEMMEFI, destinado a desarrollar una herramienta híbrida de modelado que combine los métodos de elementos finitos y de elementos discretos, para la evaluación posterior a incendios de monumentos históricos. En la actualidad, centra su investigación en el desarrollo de métodos para diagnosticar el estado estructural de edificaciones de piedra, mediante el desarrollo de técnicas experimentales y de modelado a diferentes escalas.

Charles Shahrokhh Ghavamian, experto en cálculo estático y sísmico de elementos finitos de estructuras, formador y director general asociado, en 2001 creó la empresa Sixense Necs. Con trayectoria en el campo de los estudios de ingeniería civil utilizando el método de elementos finitos, su experiencia radica en la comprensión de los fenómenos físicos, la interpretación y el desarrollo de la metodología de estudio más adecuada. Los campos de aplicación abarcan estudios sísmicos estáticos y dinámicos, tanto en el dominio lineal como no lineal del comportamiento. Es ingeniero civil con estudios en Francia y Canadá sobre la mejor estimación del modelado de estructuras de hormigón armado bajo esfuerzos sísmicos. Luego de siete años a cargo de un proyecto sobre el mantenimiento de las estructuras de contención de los reactores nucleares, asumió la responsabilidad técnica y de gestión de Sixense Necs, y la realización de trabajos técnicos. Es miembro de las asociaciones francesas de ingeniería civil AFGC, ACI Paragraphe París, RILEM y AFPS, donde ocupó los cargos de secretario general y tesorero durante 10 años.

Fabián Bernal Orozco Barrera nació en la Ciudad de México. Es arquitecto y maestro en Arquitectura por la UNAM. Durante sus estudios de maestría realizó una estancia académica en la Universidad Politécnica de Madrid, en el Departamento de Estructuras y Física de la Edificación, en 2019. Actualmente es profesor de Estructuras en la Facultad de Arquitectura de la UNAM y estudiante de doctorado en la Università degli Studi di Cagliari en el curso de Defense against Natural Risks and Ecological Transition of the Built Environment. También formó parte de la Escuela Internacional de Verano de Estructuras Históricas de Mampostería, donde participó como tutor, en Anagni, Italia, en 2021-2022, y en Segovia, España, en 2023 y 2024. Colaboró en múltiples proyectos de reestructuración y reconstrucción del patrimonio para distintas empresas, además de laborar en el área de Apoyo Técnico de la CNMH del INAH, en 2022 y 2023.

Fernando Peña Mondragón actualmente es investigador y coordinador de Ingeniería Estructural del Instituto de Ingeniería de la UNAM, donde realiza trabajos de investigación en el área de ingeniería estructural en edificaciones modernas y antiguas, y obras de infraestructura, siendo su principal línea de investigación la conservación estructural del patrimonio cultural. Es egresado de la FES Acatlán de la UNAM, donde obtuvo el título de ingeniero civil con mención honorífica. Tiene la Maestría en Ingeniería, área de Estructuras, por la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM; y el Doctorado en Ingeniería Sísmica por el Politécnico de Milán, en Italia. Realizó una estancia posdoctoral de dos años en la Universidad do Minho, sede Guimarães, Portugal, y otras estancias de investigación en el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil (LNEC) en Lisboa, Portugal; en la Universidad Politécnica de Cataluña, España; en el Politécnico de Milán, Italia, y en la Universidad de Texas en Austin, EUA, entre otras. Es miembro del SNI, socio vitalicio del CICM, socio de

la European Mechanics Society y de las Sociedades Mexicanas de Ingeniería Estructural e Ingeniería Sísmica. Actualmente es coordinador del Comité Técnico de Resiliencia de la Infraestructura del CICM y del Comité Técnico de Edificios Patrimoniales de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural (SMIE).

Mauricio Jessurun Solomou es ingeniero civil por la Facultad de Ingeniería de la UNAM, maestro en Ciencias (Investigación de Operaciones) por la London School of Economics (LSE), donde obtuvo Diploma en Estadística, además del Diploma en Asociaciones Público-Privadas otorgado por la Universidad Anáhuac. Es presidente de la Corporación UNISOL, empresa enfocada al desarrollo y comercialización de soluciones informáticas bajo modelo nube para la supervisión de obras, contratos y gerencia de proyectos. Durante 30 años fue profesor de gerencia de proyectos en la Facultad de Ingeniería de la UNAM; se desempeñó como consejero en la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC), en la Cámara Nacional de empresas de Consultoría (CNEC) y en el CICM. Fue director general del 31 Congreso Nacional de Ingeniería Civil 2021, socio emérito del CICM y académico titular de la Academia de Ingeniería México; así como presidente nacional de la CNEC de 2010 a 2013, y desde el 22 de marzo de 2024 es presidente del XL Consejo Directivo del Colegio de Ingenieros Civiles de México.

Manuel Eduardo Pérez Rivas se desempeña como responsable académico del Proyecto de Salvamento Arqueológico del Tren Maya. Además de dirigir los trabajos del Programa de Mejoramiento de Zonas Arqueológicas, y los alcances de Estudios y Proyectos de Obra Pública de Conservación, Corredor-Arqueológico Paamul II. Es investigador adscrito al INAH y responsable del Proyecto de Salvamento Arqueológico del Tren Maya. En 1994 se graduó de la Licenciatura en Ciencias Antropológicas en la especialidad de Arqueología, por la UADY, y en 2010 realizó el Doctorado en Estudios Mesoamericanos en la UNAM. En 2024 fue condecorado con la Medalla "Alberto Ruz L'huillier", al mérito a la investigación arqueológica en el área maya, por su destacada labor realizada en la región maya.

Félix Albano Camacho Zamora, restaurador licenciado por la Escuela de Conservación y Restauración de Occidente (ECRO), ha colaborado por más de ocho años con la Sección de Conservación del INAH en Campeche, coordinando el Proyecto Conservación Emergente de Sitios Arqueológicos de Campeche. Se especializa en la intervención de bienes arqueológicos, así como en el levantamiento por fotogrametría de bienes culturales. Actualmente coordina el Área de Conservación del Proyecto de Salvamento Arqueológico del Tren Maya.

Juan Antonio Rodríguez Hernández, consultor en asuntos públicos e internacionales con énfasis en los procesos de profesionalización y gestión estratégica de recursos humanos, es abogado por la UNAM y egresado de la Escuela Nacional de Administración (ENA) de Francia. Dentro de su trayectoria profesional, laboró en el gobierno federal de México en la Secretaría de la Función Pública (SFP) como director general de Desarrollo Humano y Servicio Profesional de Carrera de la Administración Pública Federal; en la Secretaría de Educación Pública (SEP) y en el gobierno de la Ciudad de México, ocupó el cargo de director ejecutivo de Profesionalización. En el gobierno francés colaboró en el Ministerio de la Educación Nacional y formó parte del Gabinete del director general en la Agencia Erasmus de Francia. Se desempeñó como profesor y conferencista en el Posgrado de la Facultad de Derecho y la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales de la UNAM, en la Universidad de Poitiers y en la Universidad de La Rochelle, en Francia, así como en el Senado de la República y diversas secretarías en México. Además, fue representante oficial del gobierno de México ante el Comité de Expertos en Administración Pública de la Organización de las Naciones Unidas (CEPA-ONU). Actualmente preside la Asociación Alumni México Francia, asociación civil dedicada a la promoción de la cooperación franco-mexicana impulsada por exalumnos mexicanos con estudios en Francia.

Joselyne Ramírez Hernández, socia fundadora y directora general de Linking Minds, es especialista en gestión de proyectos, participación ciudadana y gobernanza metropolitana. Cuenta con más de ocho años de experiencia en los campos de planificación urbana, ordenamiento territorial, ciudades inteligentes, movilidad y gobernanza. Asesora para distintos organismos públicos en México y el extranjero, ha colaborado en proyectos para el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), la Agencia de Cooperación Alemana para el Desarrollo Sustentable, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), la UAM, la Escuela de Administración Pública de la Ciudad de México y Metrópolis, entre otros. De 2019 a 2020, fue directora responsable del seguimiento de las instancias de Gobernanza Metropolitana en la Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano (SEDATU). Realizó estudios de Maestría en Administración y Políticas Públicas en la Escuela Nacional de Administración (ENA) y en la Universidad de la Sorbona, ambas en Francia. Es ingeniera en ordenamiento territorial y cuenta con la Maestría especializada en Urbanismo, Planeación y Dirección de Obra Urbana por l'École Nationale des Ponts et Chaussées, París. Actualmente es vocal de la Asociación Alumni México Francia.

Marie-Georges Pagel Brousse es presidenta de la Unión REMPART desde hace más de seis años, después de 15 años como vicepresidenta encargada de las relaciones internacionales, cargo en el que tuvo la oportunidad de poner en marcha, por primera vez, proyectos de restauración patrimonial llevados a cabo por voluntarios en varios países, como China, Rusia, Marruecos, Vietnam, Palestina, entre otros. El compromiso está en el centro de su filosofía, al igual que la igualdad y la interculturalidad. Defiende un patrimonio vivo y resiliente, en el que las personas desempeñan un papel activo y se comunican, aprendiendo a conocerse y respetarse. Ahora apuesta por promover el patrimonio como herramienta esencial para la transición ecológica, accesible para todos y como nexo de unión entre las personas.

Johanna O'Byrne es licenciada en Ciencias Políticas y Sociales en Francia. Trabajó durante 20 años en co-

municación para las autoridades locales y luego en el Senado francés. La conmoción de los atentados de 2015 en París, la llevó a reorientar su vida profesional hacia el campo de la cultura, a fin de contribuir al bienestar y a la cohesión social. Se especializó en patrimonio durante un curso de formación en gestión de proyectos culturales y decidió dedicarse a su pasión: el patrimonio, el cual, "además de embellecer nuestra vida cotidiana, es un vínculo entre generaciones, un gran apoyo para el intercambio, la transmisión de conocimientos y los diálogos interculturales", misiones que comparte con los equipos de REMPART, a los que se unió en 2021 para desarrollar la red internacional, porque están convencidos de que "el patrimonio es una forma maravillosa de compartir y conectar a las personas, un factor de diálogo intercultural y de paz".

José Alejandro Arredondo Guillén, arquitecto egresado del ITESM radicado en Francia, ganó el Premio BIM Influencer en ese país –reconocimiento que se otorga a los profesionales más innovadores e influyentes en torno al Modelado de Información de Construcción (BIM)–. Especializado en modelos digitales en Art Graphique et Patrimoine, agencia de ingeniería especializada en monumentos históricos que ha participado en intervenciones a recintos como el Arco del Triunfo y el Museo del Louvre, en París, entre otros, fue elegida por las autoridades francesas para desarrollar las proyecciones 3D que sirvieron de base para la reconstrucción de la Catedral de Notre Dame de París. Originario del Estado de México, coordinó un equipo que capturó información de toda la catedral mediante el uso de escáneres tridimensionales y drones de alta precisión, incluidos aquellos ángulos que resultaban prácticamente inaccesibles, lo que permitió levantar planos, modelos y, de manera particular, una maqueta tridimensional realizada a partir de la base de datos obtenida. Docente en La Sorbona de París y en l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques, es el único latinoamericano que participó en los trabajos de recuperación de Notre Dame, demostrando el poder de la arquitectura para reconstruir el pasado.

Beatriz Menéndez Villar es doctora en geología por la Universidad de Oviedo, España, actualmente es catedrática en la Universidad Cergy París, e investigadora en el Instituto de Ciencias de la Tierra (ISTeP, por sus siglas en francés), de la Universidad de la Sorbona. Ha trabajado en diferentes universidades como la Estatal de Nueva York Stony Brook (SBU) y el Instituto de Física del Globo de París (IPGP, por sus siglas en francés). Sus trabajos de investigación se han orientado al estudio del almacenamiento de residuos radiactivos en el subsuelo, al almacenamiento de CO_2 en acuíferos y a la degradación de las piedras del patrimonio arquitectónico, mediante estudios de petrofísica y geomecánica. En la Universidad de Cergy inició una línea de investigación sobre la conservación y restauración del patrimonio cultural. Ha establecido una importante red internacional de investigación con grupos de todos los continentes y participa en varios grupos de trabajo, nacionales e internacionales. Desde 2021 coordina el proyecto europeo SCORE (Sustainable COnservation and REstoration of built cultural heritage), que integra a grupos de investigación, instituciones nacionales, organizaciones no gubernamentales y empresas de Francia, España, Italia, Dinamarca, México y Colombia. Además, participa en la organización del Stone 2025, XV Congreso Internacional sobre el Deterioro y la Conservación de la Piedra, a celebrarse del 8 al 12 de septiembre en París, precedido de una escuela de verano sobre la conservación de la piedra en Cergy.

Salvador Fernández del Castillo Flores es ingeniero civil egresado de la UNAM, y perito en desarrollo urbano y en gerencia de proyectos. Participó en el Programa de Especialización de Alta Dirección de Empresas del IPADE Ad-2, así como en múltiples diplomados y seminarios, en Estados Unidos y Chile. Colaboró en más de 500 proyectos y obras ubicadas en 30 estados de México y en obras como el Estadio Azteca y las realizadas para los Juegos Olímpicos de 1968. Fue parte de la Dirección de Construcción de Dodoma, capital de la República Unida de Tanzania. Es miembro del Consejo Directivo del CICM, coordinando diversos comités. Fue consejero y asesor de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda (SEDUVI) de la Ciudad de México, de la Comisión Nacional para la Protección y Defensa de los Usuarios de Servicios Financieros (CONDUSEF), entre otros. Fue el primer coordinador de la Fundación para el Desarrollo Tecnológico y la Productividad de la Industria de la Construcción, donde fomentó la introducción de nuevas tecnologías. Participó como organizador y ponente en reuniones celebradas en Estados Unidos, Paraguay y Canadá, entre otras a nivel nacional. Colaboró como jurado en el Primer Concurso de Tecnologías para la Vivienda-SEDESOL, Premio Lieberman a la mejor obra, premios Cemex a la Vivienda y Premios a la Movilidad Intertraffic, de carácter internacional. Ha publicado en revistas especializadas y periódicos; es coautor de los libros *Estudio de integración de proyectos de infraestructura, La competitividad en la industria de la construcción, Retos y oportunidades de la ingeniería civil, Un emigrante en Guanajuato y el nacimiento de una nación*, este último de contenido histórico. Actualmente se desarrolla profesionalmente como consultor. Fue director general de empresas de construcción y de servicios durante varias décadas. Fundador y socio de diversas empresas de consultoría.

Ana Fernanda González Cruz es ingeniera civil por el ITESM y cuenta con la Maestría en Planeación Urbana y Sustentabilidad por la Universidad Polytech Tours, Francia, obtenida a través del Programa de Becas de Alumnos Francia del CICM. Su tesis de posgrado se centró en la importancia de la preservación de áreas verdes y su papel dentro de la planeación urbana. Actualmente, forma parte del Comité Técnico de Desarrollo Urbano Sustentable y de Turismo del CICM. Cuenta con experiencia en supervisión civil, control de costos y gestión de proyectos en construcción. Trabajó para empresas como Cemex, donde participó en proyectos de innovación con enfoque sustentable y de impacto social. Su trabajo se enfoca en la optimización de procesos constructivos y la implementación de soluciones sustentables en proyectos urbanos e infraestructura. A través de una beca de movilidad internacional del Programa Vive México, en Portugal realizó servicio social enfocado en la preservación de la herencia cultural.

Benjamín Romano, arquitecto fundador del despacho LBR&A, sus proyectos han recibido reconocimiento internacional, como la Torre Reforma en la Ciudad de México, primer edificio LEED Platino en México, distinguido como "El Mejor Rascacielos del Mundo" por el International Highrise Award 2018, y como uno de "los 50 rascacielos más influyentes del mundo de los últimos 50 años", por el Consejo de Edificios Altos y Hábitat Urbano (Council on Tall Buildings and Urban Habitat, CTBUH). Entre los galardones recibidos están la Medalla de Oro en la XIV Bienal Nacional de Arquitectura Mexicana 2016; el Premio Augusto A. Álvarez 2014, por la Federación de Arquitectos de México; el Premio Luis Barragán al Mérito Profesional; en 2022, el "Best of the Best" en la categoría de Arquitectura por el Proyecto CH73, otorgado por el Consejo Alemán de Diseño; el Iconic Awards: Innovative Architecture, 2023, y también en ese año recibió la Medalla al Mérito en Artes en la categoría Arquitectura, entregada por el Congreso de la Ciudad de México. Entre sus proyectos recientes se encuentra la nueva Terminal 2 del Aeropuerto Internacional de Puerto Vallarta (PVR), la primera de energía cero en América Latina. De 2016 a 2017 fue invitado como experto residente para impartir clases en la Escuela de Diseño y Arquitectura de la Universidad de Harvard. También, durante más de dos décadas, dirigió el Taller de Construcción en el Departamento de Arquitectura de la Universidad Iberoamericana. Recientemente fue galardonado como Académico Emérito de la Academia Nacional de Arquitectura 2023.

Jean-François Duarte-Paixao, teniente coronel oficial de la Brigada de Bomberos de París desde hace más de 20 años, es un prevencionista apasionado y experimentado. Después de una primera parte de su carrera operativa en una compañía de bomberos, fue adjunto y luego jefe del Departamento de Prevención y Seguridad contra Incendios del Museo del Louvre. Posteriormente, sirvió durante 13 años en la Oficina de Prevención del Cuerpo de Bomberos de París, en esta dependencia fue responsable asociado de la reescritura del código de la construcción y la vivienda en Francia; de revisiones de diversas normas de seguridad para establecimientos abiertos al público, edificios residenciales, edificios de gran altura, instalaciones clasificadas para la protección del medio ambiente, entre otros; de la redacción de textos técnicos de la Prefectura de Policía relativos a las nuevas energías (vehículos eléctricos y de hidrógeno); de 2016 a 2019, se encargó de conciliar las cuestiones de seguridad y protección tras los atentados de 2015; en 2021 fue responsable de la formación sobre el uso de materiales de base biológica en la construcción, así como de los programas Reinventar París I y II, de 2017 a 2020. A partir de una formación universitaria inicial en literatura, obtuvo varios másteres en los campos de la gestión y gestión de riesgos. Desde hace más de 20 años imparte cursos en diversas instituciones como la Escuela Nacional de Bomberos (ENSOSP), el Conservatorio Nacional de Artes y Oficios (CNAM), el Instituto Nacional del Patrimonio (INP), la Escuela del Louvre, la Escuela Chaillot, La Sorbona, entre otros. Desde 2023 está adscrito a la Misión de Seguridad, Protección y Auditoría (MISSA), como asesor de seguridad contra incendios de museos en la Dirección General de Patrimonio y Arquitectura, del Ministerio de Cultura de Francia.

Oscar Solís Yépez, PMP, es ingeniero civil por la UNAM con maestría en Administración de la Construcción por la Universidad Iberoamericana, y certificado como PMP® (Project Management Professional) por el Project Management Institute (PMI), además de otras especializaciones en gerencia de proyectos. Con 34 años de trayectoria, ha liderado iniciativas de estandarización, certificación ISO-9001 y transformación digital en ACONSA, empresa de consultoría en gerencia de proyectos, donde es director general. Actualmente preside el Consejo Directivo de la Cámara Nacional de Empresas de Consultoría (CNEC) y es miembro activo de comités técnicos del CICM. Ha colaborado en proyectos emblemáticos de edificación y conservación, aplicando metodologías innovadoras para la gestión eficiente de recursos y tecnologías. Su experiencia y compromiso con la profesión lo han llevado a participar en foros nacionales e internacionales, promoviendo el uso de herramientas tecnológicas y enfoques de gerencia de proyectos.

Francisco Ramos Kuri es ingeniero civil por la UAM. Participó en el Curso de especialidad en cimentaciones profundas en el Instituto Tecnológico de la Construcción en 1994 y 1995, así como en el Curso de alta dirección de empresas, realizado en el Instituto Panamericano de Alta Dirección de Empresas (IPADE), entre los años 1996 y 1997. En su experiencia laboral, participó en la restauración de templos y monumentos coloniales de 1981 a 1986; fue gerente general de la empresa Conservación Pilotes de Control, SA, de 1986 a 2005, enfocado a conservar la verticalidad de 250 edificios, entre los que destacan 20 hospitales del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), el conjunto administrativo Pemex en la Ciudad de México, y los edificios coloniales de la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México y Sagrario Metropolitano, el templo de las Capuchinas, el Museo Franz Mayer, la Basílica de Guadalupe antigua y nueva, los templos de San Juan de Dios, de la Santa Veracruz y de San Marcos Mexicaltzingo, entre otros. Es director general de Grupo Pilotes de Control, SA, desde 2005, donde ha trabajado en la recimentación y renivelado de edificios, destacando el Hotel Camino Real del Aeropuerto de la Ciudad de México; el Hospital General Regional de Zona 1º, Los Venados; el Hospital General Regional 196, de Ecatepec de Morelos, Estado de México; y los edificios catalogados por el Instituto Nacional de Bellas Artes (INBA): Palacio de Justicia, en San Lázaro, donde se encuentran los tribunales del Consejo de la Judicatura Federal, en la Ciudad de México, así como los edificios A, B y H, del Palacio Legislativo de San Lázaro (Cámara de Diputados), entre otros.

Teresa Menchelli Pérez es licenciada en Comunicación por la UAM, maestra en Comunicación y Estudios de la Cultura por el Instituto de Comunicación y Cultura (ICONOS), y maestrante en Ciencias del Lenguaje por la ENAH. Es coordinadora del área de Comunicación Educativa del Museo de la Fotografía del Sistema Nacional de Fototecas (SINAFO-INAH). Su desarrollo profesional se especializa en la gestión cultural, mediación, interpretación y semiótica cognitiva para el análisis e instrumentación de contenidos y proyectos de divulgación cultural. En colaboración con el doctor Manuel Gándara Vázquez, coordina el Seminario

"Compartiendo experiencias de divulgación del patrimonio cultural mediante tecnologías de representación visual digital", desde 2021. Fue miembro del Comité Organizador del XI Seminario Permanente de Museología en América Latina (SEPMAL-ENCRyM), edición 2021, y miembro de la Asociación Mexicana de Intérpretes (INTERPAT MX). Se desempeñó como asesora educativa y gestora cultural del Museo de El Carmen; guionista y tallerista de contenidos didácticos en la Subdirección de Fomento del Hábito de la Lectura en el antes Consejo Nacional para la Cultura y las Artes (CONACULTA) hoy Secretaría de Cultura; fue locutora del programa *El huevo del dragón*, en la estación de la ENAH, Radio Zapote; fue docente temporal en el eje de Comunicación y Cultura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM), además de articulista en publicaciones culturales y académicas.

Roberto Aguerrebere Salido es ingeniero civil con mención honorífica por la UNAM. Cuenta con una especialidad en Aseismic desing of buildings en el Insititute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology y es maestro en Planificación Regional y Urbana por la École Nationale des Ponts et Chaussées (París-Tech). Durante más de 30 años colaboró en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) del cual llegó a ser director general. Es miembro del CICM y de la AMIVTAC, así como de la PIARC. Es miembro fundador de la Asociación Alumni México Francia y Consejero del I Consejo Directivo.

Manuel Dueñas García es arqueólogo, doctor en Humanidades interdisciplinarias y especialista en patrimonio digital. Su trabajo se centra en la aplicación de tecnologías 3D, Sistemas de Información Geográfica (SIG) y fotogrametría para la documentación, conservación y difusión del patrimonio arqueológico en México y el extranjero. Actualmente colabora en proyectos de innovación museográfica y divulgación científica.

José Luis Punzo Díaz es arqueólogo egresado de la ENAH, tiene la Maestría en Ciencias y Humanidades con terminación en Historia, por la Universidad Juárez del estado de Durango. Doctor en Arqueología por la ENAH, es miembro del SNI Nivel 2, fue director del Museo de las Culturas del Norte en Paquimé, Chihuahua, y actualmente es investigador en arqueología adscrito al Centro INAH-Michoacán. Se desempeñó como director de múltiples proyectos arqueológicos en los estados de Durango y Michoacán, así como de proyectos regionales en el occidente, norte de México y suroeste de Estados Unidos. Fue investigador principal de las zonas arqueológicas de La Ferrería, en Durango, y Tingambato y Tzintzuntzan, en Michoacán. Participó también, en múltiples proyectos museográficos. Ha publicado una centena de capítulos de libros, artículos científicos y de divulgación, además de cinco libros de divulgación e investigación científica. Hizo distintas estancias de investigación en museos y universidades de Europa y la Unión Americana. Las principales líneas de investigación están relacionadas con la arqueología del occidente, norte de México y el suroeste estadounidense, la arquitectura prehispánica, la metalurgia prehispánica, la arqueología del paisaje, así como las aplicaciones computacionales en arqueología.

Alfonso Gastélum Strozzi es Investigador Asociado "C" en el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) de la UNAM, adscrito al Departamento de Instrumentación Científica e Industrial donde dirige el Laboratorio BioComLab. Es físico y tiene un doctorado en Ciencias de la Computación por la universidad de Auckland. Su línea de investigación abarca visión por computadora, inteligencia artificial, procesamiento y análisis de big data, simulación numérica y desarrollo de aplicaciones biomédicos, con aplicaciones que van desde la atención clínica en hospitales de tercer nivel a el desarrollo de proyectos de salud comunitaria. Además de esto tiene trabajos en áreas sociales de historia y arqueológicos mediante realidad virtual y aumentada.

Édgar Santiago Ferreyra Alanís es arquitecto egresado de la Universidad Michoacana y director fundador de ADV Estudio Arqueología Virtual. Su trayectoria abarca la restauración de monumentos históricos en Michoacán y la colaboración con el INAH. Se ha especializado en la recreación digital de sitios arqueológicos para hacerlos más accesibles para un público ávido de experiencias interactivas que los acerquen a conocer su herencia cultural, un trabajo que ha captado la atención de cadenas como Discovery Channel e History Channel. Actualmente, lidera el proyecto "Maravillas del México Antiguo" para fomentar el interés en el patrimonio cultural del país, a través de visualizaciones digitales. Su enfoque combina la preservación del pasado con la tecnología para inspirar a nuevas generaciones.

Ángel Mora Flores, licenciado en diseño gráfico por la Universidad Tecnológica de México, y maestrante en Administración de Negocios por la misma universidad. Desde 1995 se incorporó a la CNMH del INAH para realizar la sistematización del Catálogo Nacional de Monumentos Históricos Inmuebles. A partir de 2008 es el responsable de la Unidad de Apoyo Tecnológico para Monumentos Históricos, con el objetivo de implementar la tecnología de escaneo por barrido láser 3D para realizar levantamientos arquitectónicos del patrimonio histórico y arqueológico de México. En 2010, en conjunto con catedráticos del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio, de la Universidad Politécnica de Valencia, España, conformaron en el INAH el Laboratorio de Imagen y Análisis Dimensional, que a la fecha ha producido 142 levantamientos arquitectónicos 3D por escaneo láser, así como la digitalización tridimensional de bienes muebles y patrimonio histórico sumergido, mediante el escaneo de luz estructurada y fotogrametría digital. En coautoría publicó los libros *Implementación de nuevos métodos de documentación y registro fotogramétrico digital para la protección y puesta en valor del patrimonio monumental mexicano*, así como el titulado *Tecnología 3D por barrido láser aplicada al estudio, protección, conservación, restauración y difusión del patrimonio cultural de México*, como resultado del financiamiento otorgado por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) al INAH. Es autor de diversos artículos publicados en

revistas especializadas, conferencista y miembro de la Sociedad Mexicana de Egiptología, por lo cual se realizó el levantamiento arquitectónico por escaneo láser 3D en su primera etapa de la Tumba Tebana 39, en Luxor, Egipto, en apoyo al proyecto de restauración.

Agradecimientos

Instituciones
Secretaría de Cultura de México
Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH)
Coordinación Nacional de Monumentos Históricos (CNMH)
Museo Nacional de Antropología (MNA)
Embajada de México en Francia

Ministerio de Cultura de Francia
Embajada de Francia en México
Instituto Francés de América Latina (IFAL)
Universidad de Cergy

Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM)

Asociación Alumni México Francia, AC

Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Puebla (CICEPAC), AC

Patrocinadores
Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM)
Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH)
Equipos Mejores
Freyssinet de México
GALAPE Inmuebles
Euro Estudios
Midas Latinoamérica
Sixense México
Sistemas y Servicios para Topografía (Systop)
Supervisión, Consultoría, Asesoría y Laboratorio (Scala)
TGC
HSR
Nah K'Uh

Participantes en el Encuentro México-Francia
Estudiantes:
1. Evelyn Valeria Octavio Reyes
2. Lauro Uriel Justo Seseña
3. Minerva Esperanza Sacadas Olvera
4. Alan Ayala Jiménez
5. Carolina Peña Reyna
6. Claudia Alejandra González González
7. Erick Rodríguez Rosado
8. Maya Lizeth Monroy González
9. José Luis Demetrio Elizalde Estrada
10. Alejandro Ernesto Góngora Contreras
11. Josué Ignacio Vera Cruz
12. Aislin Alexia Franco Portillo
13. Mariana Ríos Nava
14. Diana Paola Rosas Meza
15. Rogel Alejandro Prats Morales
16. Claudio Cortes Rojas

Euro Estudios:
1. Laura Nayeli Guerrero Barajas
2. Julio César Hernández Hernández

Juan Pablo Vázquez Rosas
Coordinador de Staff-Estudiantes

Traducción simultánea en el evento
Karsa Capacitación Empresarial











Crédito: CICM-Imagen en evento. Esta página



Crédito: INAH-Ángel Mora Flores
Reproducción autorizada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de acuerdo a los artículos 3 y 17 de la LFDAAAH y 38, 39, 40 y 41 de su Reglamento.



Crédito: CICM-Imagen en evento

Encuentro México y Francia

Innovación y uso de la tecnología
en la conservación del patrimonio cultural



Rencontre entre le Mexique et la France

L'innovation et l'utilisation de la technologie
dans la conservation du patrimoine culturel