

Estudio Subterráneo con Radar de Penetración Terrestre en República de Perú 57, Centro Histórico de la Ciudad de México

Fecha: 20/11/2024



MAPA DE ZONAS DE INTERÉS

Relación Espacial entre el Estudio GPR y Sitios Históricos del Centro de CDMX

SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA

Índice

Índice	1
Resumen Ejecutivo	3
La migración de los mexicas	4
La llegada a Tenochtitlán	4
Separación entre tenochcas y tlatelolcas y la enemistad entre ellos	4
La anexión de Tlatelolco por parte de Tenochtitlán	5
La importancia de los mercados y el comercio para los mexicas	5
La conquista de Tenochtitlán	5
La sociedad novohispana	5
Antecedentes	7
Objetivos del Estudio	8
Objetivo Principal	8
Objetivos Específicos	8
Recopilación y Análisis de la Información	9
Periodo Prehispánico: El Legado de los Mexicas	9
La Conquista y la Transformación Novohispana	9
Contexto Actual y Relevancia Arqueológica	9
Localización y Descripción del Área de Estudio	11
Localización Geográfica	11
Vías de Comunicación	11
Clima	12
Fisiografía	12
Descripción General	12
Características Fisiográficas Principales	12
Geología	14
Estratigrafía y Composición	14
Geofísica	16
Introducción	16
Método de Radar de Penetración Terrestre (GPR)	16
Principios Físicos del Método	16
Tipo de Arreglo Utilizado	16
Equipo Utilizado	17
Trabajos de Campo y Gabinete	17
1. Corrección de Ganancia	18
2. Filtrado de Ruido	18



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA

3. Migración de Datos	18
4. Corrección de Tiempo Cero	18
5. Interpolación y Kriging	18
6. Análisis de Textura	19
Interpretación de Datos Geofísicos	20
Interpretación Cualitativa	20
Resultados por profundidad:	20
Interpretación Cuantitativa	21
Interpretación de zonas de baja amplitud:	21
Interpretación de zonas de alta amplitud:	21
Interpretación Final	21
Resultados de los Estudios Geofísicos	23
Validación de Resultados	23
Interpretación Arqueológica	23
Conclusiones y Recomendaciones	24
Conclusiones Iniciales	24
Recomendaciones para Excavación	24
Propuestas para Estudios Complementarios	24
Bibliografía	26



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA

Resumen Ejecutivo

Este informe describe el levantamiento geofísico realizado mediante Radar de Penetración Terrestre (GPR) en el inmueble ubicado en República de Perú 57, en el Centro Histórico de la Ciudad de México. El objetivo del estudio es la identificación de estructuras arqueológicas subterráneas, como cimientos, canales o posibles restos arquitectónicos. Se presentan los métodos utilizados, los resultados preliminares y recomendaciones para investigaciones futuras.



Ilustración 1. Mapa del centro de la ciudad de México, con los sitios de interés para el estudio



Historia Contada

La migración de los mexicas

La historia de los mexicas comienza con un largo viaje de su lugar mítico de origen, Aztlán, guiados por su dios Huitzilopochtli. Durante esta peregrinación, el grupo cargaba consigo dos bultos sagrados, que simbolizaban elementos fundamentales de su identidad y su relación con las deidades. Uno de estos bultos contenía una piedra preciosa, símbolo de la luna, mientras que el otro albergaba unos palos, símbolo del sol y de la fuerza guerrera.

En el transcurso de la travesía, surgió una discusión sobre a quién le correspondería cada bulto, pues ambos grupos querían quedarse con el objeto máspreciado. La rivalidad creció hasta que se decidió que la piedra preciosa sería llevada por los tlatelolcas y los palos quedarían en manos de los tenochcas.

Esta división no solo marcó una separación simbólica entre los dos grupos,



Ilustración 2. Representación de la zona ocupada por los mexicas. Imagen tomada de <https://tenochtitlan.thomaskole.nl/es.html>

sino que sentó las bases de la identidad dual que mantendrían en el futuro. Los tlatelolcas, guardianes de la piedra preciosa, representarían la luna, el misterio y el comercio; mientras que los tenochcas, con los palos en sus manos, representarían el sol, la fuerza y la autoridad militar.



Ilustración 3. Representación de la zona ocupada por los mexicas. Imagen tomada de <https://tenochtitlan.thomaskole.nl/es.html>

La llegada a Tenochtitlán

Después de años de vagar por el Valle de México y de ser rechazados por otras civilizaciones, los mexicas finalmente encontraron el lugar prometido. En un islote en medio del lago de Texcoco, vieron el signo profético: un águila posada sobre un nopal, devorando una serpiente. Esta visión, interpretada como una señal de Huitzilopochtli, marcó el inicio de la construcción de Tenochtitlán en 1325. Con ingenio y arduo trabajo, los mexicas desarrollaron chinampas —islas artificiales para la agricultura— y lograron convertir aquel inhóspito islote en una próspera ciudad.

Separación entre tenochcas y tlatelolcas y la enemistad entre ellos



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA

Con el tiempo, la ciudad de Tenochtitlán prosperó, y los mexicas crecieron en número y poder. Este crecimiento motivó una nueva división: los tlatelolcas, que habían preservado su identidad como portadores de la piedra preciosa, se establecieron en un islote vecino y fundaron la ciudad de Tlatelolco. Aunque ambas ciudades compartían raíces y dioses, la rivalidad entre ellas comenzó a manifestarse. Los tenochcas, con su identidad guerrera y solar, se concentraron en expandir su poder político y militar, mientras que los tlatelolcas, asociados a la luna y el comercio, desarrollaron el mercado más grande y activo de la región, que atraía a mercaderes de todo Mesoamérica.

Con el tiempo, esta rivalidad se intensificó. Los tenochcas veían con recelo la prosperidad comercial de Tlatelolco, mientras que los tlatelolcas resentían la creciente autoridad militar de Tenochtitlán. La tensión entre ambas ciudades hermanas no solo era una cuestión de intereses económicos, sino también una disputa simbólica: el poder solar de los tenochcas enfrentado a la influencia lunar de los tlatelolcas.

La anexión de Tlatelolco por parte de Tenochtitlán

La rivalidad finalmente llegó a su punto máximo en el siglo XV, cuando el emperador tenochca Axayácatl decidió someter a Tlatelolco. En un enfrentamiento breve pero decisivo, Tenochtitlán venció a Tlatelolco y anexó la ciudad bajo su control. Desde entonces, Tlatelolco quedó subordinado a Tenochtitlán y su famoso mercado pasó a estar bajo la supervisión de los tenochcas. Esta unificación consolidó el poder de Tenochtitlán en el Valle de México y reafirmó su supremacía sobre la región.

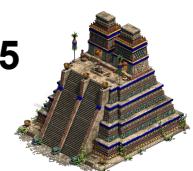
La importancia de los mercados y el comercio para los mexicas

El mercado de Tlatelolco, ahora controlado por Tenochtitlán, se convirtió en el centro económico más importante de Mesoamérica. Era un lugar de intercambio donde se comerciaban productos de toda la región: alimentos, textiles, herramientas, e incluso objetos de lujo como plumas exóticas, jade y oro. Además, el mercado no solo cumplía una función económica, sino también cultural, ya que representaba un punto de encuentro para personas de diferentes culturas y regiones. La importancia del comercio para los mexicas era tal que su control sobre Tlatelolco y su mercado consolidaba la estabilidad y riqueza de su imperio.

La conquista de Tenochtitlán

Pero el esplendor de Tenochtitlán no duraría para siempre. En 1519, Hernán Cortés y sus tropas españolas llegaron a tierras mesoamericanas, y después de formar alianzas con enemigos de los mexicas, marcharon hacia Tenochtitlán. En 1521, tras meses de enfrentamientos y un asedio brutal, la gran ciudad cayó bajo el control de los conquistadores. Con su caída, también comenzó la destrucción del esplendor mexica y la imposición de un nuevo orden colonial.

La sociedad novohispana



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA

La conquista dio origen a una nueva sociedad en la Nueva España, caracterizada por una compleja mezcla de indígenas, españoles y africanos. La sociedad novohispana estaba organizada en una jerarquía rígida, donde los españoles y sus descendientes criollos ocupaban los niveles superiores, mientras que los indígenas y africanos quedaban en la base de la pirámide social. A pesar de la imposición de una nueva religión y sistema político, muchos elementos de la cultura mexica sobrevivieron, y las prácticas agrícolas, creencias y tradiciones locales se mantuvieron en la vida cotidiana.

Con el tiempo, la sociedad novohispana se fue transformando, y esa mezcla de culturas es lo que hoy define la identidad de México. A través de las ruinas y en las tradiciones, la esencia de los mexicas y de Tenochtitlán sigue viva, como un eco del pasado que aún resuena en la identidad mexicana actual.



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA

Antecedentes

El sitio ubicado en República de Perú 57, dentro del Centro Histórico de la Ciudad de México, destaca por su importancia arqueológica y cultural debido a su posible relación con ocupaciones humanas tanto prehispánicas como coloniales. Esta zona forma parte del núcleo original de la gran ciudad de México-Tenochtitlán, la cual fue el epicentro político, religioso y cultural de los mexicas. Tras la conquista española, el área se transformó en un punto clave del trazado urbano colonial, lo que significa que el terreno podría contener vestigios de ambas épocas.

Esta doble ocupación histórica convierte al lugar en un entorno de gran interés para la arqueología subterránea. Bajo la superficie, podrían encontrarse estructuras de carácter ceremonial, habitacional o hidráulico, tales como canales, cimientos de templos o restos de edificaciones coloniales tempranas. Además, la riqueza histórica del área lo posiciona como un espacio único para comprender las interacciones y transformaciones culturales que ocurrieron en el periodo de transición entre las épocas prehispánica y colonial.

El presente estudio se enfoca en identificar y caracterizar posibles estructuras subterráneas mediante técnicas no invasivas, como el Radar de Penetración Terrestre (GPR). Este método resulta ideal para explorar el subsuelo sin alterar los estratos arqueológicos, permitiendo delimitar áreas de interés y priorizar futuras excavaciones de forma precisa y respetuosa con el patrimonio cultural. La investigación busca, además, contribuir al conocimiento histórico del área y ofrecer un enfoque riguroso para evaluar la viabilidad de la construcción de una bodega subterránea sin comprometer los restos arqueológicos que pudieran estar presentes.



Objetivos del Estudio

Objetivo Principal

El objetivo principal de este estudio es detectar y analizar anomalías en el subsuelo que puedan corresponder a estructuras arquitectónicas antiguas, con el fin de evaluar la viabilidad de construir una bodega subterránea en el sitio sin afectar posibles restos arqueológicos de valor histórico.

Objetivos Específicos

1. Identificar patrones que indiquen la presencia de cimientos, muros u otras construcciones enterradas que puedan interferir con el proyecto de construcción de la bodega subterránea.
2. Mapear las zonas del sitio de estudio que contengan posibles restos arqueológicos, para planificar la bodega de manera que evite estas áreas y proteja el patrimonio cultural.
3. Proveer una interpretación preliminar de las anomalías subterráneas, con recomendaciones específicas que faciliten el diseño y construcción de la bodega en áreas seguras, libres de patrimonio arqueológico.



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA

Recopilación y Análisis de la Información

El área donde se encuentra República de Perú 57, en el Centro Histórico de la Ciudad de México, está profundamente conectada con la rica historia de México-Tenochtitlán y el periodo colonial. Este territorio fue parte de la capital del imperio mexica, una de las civilizaciones más avanzadas de Mesoamérica, y después se transformó en un núcleo esencial durante el virreinato de la Nueva España.

Periodo Prehispánico: El Legado de los Mexicas

La fundación de México-Tenochtitlán en 1325 marcó el inicio de una ciudad que se convertiría en el centro político, económico y religioso más importante del Valle de México. Construida sobre un islote en el lago de Texcoco, la ciudad era una maravilla de la ingeniería hidráulica y agrícola, con sus chinampas y complejos sistemas de canales. Esta área probablemente albergó espacios clave para actividades residenciales, rituales o comerciales, aspectos esenciales en la vida mexica.

La expansión territorial y cultural de los mexicas convirtió a Tenochtitlán en la metrópolis dominante de Mesoamérica. Sin embargo, esta grandeza también incluyó rivalidades internas, como la relación simbólica y política entre los tenochcas y los tlatelolcas. La anexión de Tlatelolco consolidó la hegemonía de Tenochtitlán, y su mercado, el más importante de la región, atrajo productos de todos los confines del imperio. Estas dinámicas contribuyen al interés arqueológico del área, ya que es posible que los vestigios de esta interacción histórica estén presentes bajo el suelo.

La Conquista y la Transformación Novohispana

La caída de Tenochtitlán en 1521 marcó el inicio de un periodo de profundas transformaciones. El nuevo orden colonial impuso cambios políticos, sociales y religiosos que dieron lugar a la construcción de templos, conventos y edificios administrativos en el terreno que antes ocupaba la ciudad mexica. Esta superposición de culturas dejó una huella indeleble en la geografía y el subsuelo del Centro Histórico.

Durante el periodo virreinal, esta área se convirtió en un espacio estratégico dentro del diseño urbano de la Ciudad de México. La reorganización del territorio mantuvo muchas de las trazas mexicas, pero con una reinterpretación europea. Por ello, es común encontrar restos arqueológicos que mezclan elementos de ambas culturas, desde cimientos de templos mexicas hasta estructuras coloniales tempranas.

Contexto Actual y Relevancia Arqueológica

El Centro Histórico de la Ciudad de México, declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 1987, es un área de extraordinaria riqueza arqueológica. En particular, el terreno de República de Perú 57 podría contener vestigios de estructuras prehispánicas o



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA

coloniales debido a su ubicación dentro de una de las zonas más dinámicas de la antigua Tenochtitlán.

La arqueología subterránea en esta área ha revelado hallazgos sorprendentes en el pasado, como cimientos de templos, restos de sistemas hidráulicos y objetos cotidianos. Estas características refuerzan la necesidad de realizar estudios detallados, como el uso del GPR, para identificar y proteger el patrimonio cultural que pueda estar presente en el subsuelo.



Localización y Descripción del Área de Estudio

Localización Geográfica

La investigación se llevó a cabo en el sitio específico de República de Perú 57, en el Centro Histórico de la Ciudad de México. Se incluyen coordenadas geográficas y un mapa que ilustra la posición relativa del sitio dentro de esta zona de relevancia histórica.



Ilustración 4. Este mapa muestra la ubicación exacta del área de estudio, resaltando las tres mallas exploradas mediante GPR en el sitio arqueológico.

Vías de Comunicación

La zona de estudio se ubica en la calle República de Perú, en el centro de la Ciudad de México, lo cual facilita su acceso mediante varias rutas de transporte público y privado. Esta ubicación céntrica permite el acceso rápido al área, lo cual es esencial para el traslado y montaje del equipo de geofísica, así como para el desplazamiento del personal técnico. Las



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA

principales avenidas y calles aledañas ofrecen una conectividad óptima para la logística del proyecto, reduciendo tiempos de traslado y facilitando la operación.

Clima

Durante el otoño, el clima en la Ciudad de México es templado, con temperaturas promedio que oscilan entre 12°C y 22°C, aunque pueden presentarse variaciones en el transcurso del día. Las lluvias son moderadas en esta temporada, aunque pueden ocurrir chubascos ocasionales. Estas condiciones climáticas son importantes de considerar, ya que la humedad en el suelo y las lluvias pueden influir tanto en la conservación de las estructuras arqueológicas como en el rendimiento del equipo de radar de penetración terrestre (GPR).

Fisiografía

Descripción General

El Cinturón Neovolcánico Transversal (CNT), también conocido como Eje Volcánico Transversal, es una de las principales provincias fisiográficas de México, que atraviesa el país de costa a costa en dirección aproximadamente este-oeste. Este cinturón se extiende desde el océano Pacífico en el occidente hasta el golfo de México en el oriente, y representa una zona de intensa actividad geológica y vulcanismo activo e histórico. La región es conocida por albergar numerosos volcanes de gran altura y una topografía variada que va desde altas cumbres volcánicas hasta planicies y valles intermontanos. Estas características influyen de manera significativa en la fisiografía de la zona, afectando tanto las condiciones del subsuelo como la preservación de estructuras arqueológicas enterradas.

Características Fisiográficas Principales

1. Elevaciones y Relieve:

- El CNT cuenta con algunos de los picos más altos de México, como el Popocatépetl, el Iztaccíhuatl, el Nevado de Toluca y el Pico de Orizaba, este último siendo el punto más alto del país. Estas montañas volcánicas presentan elevaciones que superan los 5,000 metros sobre el nivel del mar, lo cual genera condiciones climáticas y ambientales diversas.
- El relieve de la región es montañoso en gran parte, intercalado con valles, cuencas y depresiones como el Valle de México y el Valle de Toluca, que han sido tradicionalmente áreas densamente pobladas.

2. Tipos de Suelo y Materiales Geológicos:

- La composición geológica del CNT es rica y variada, con predominancia de rocas volcánicas como basaltos, andesitas y tobas, formadas a partir de erupciones volcánicas de diferentes épocas. Los flujos de lava y depósitos piroclásticos también son comunes.



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA

- Este tipo de suelo volcánico suele ser fértil y propicio para la agricultura, pero también puede presentar condiciones de estabilidad variables que afectan la preservación de estructuras en el subsuelo.
- Los materiales volcánicos también pueden influir en la penetración y reflexión de las ondas de radar, lo cual es un aspecto relevante para la interpretación de los datos de GPR en estudios arqueológicos.

3. Clima y Vegetación:

- La variabilidad en altitud genera diversos microclimas, que van desde climas templados en las zonas bajas y valles, hasta climas fríos en las altas cumbres.
- Esta diversidad climática influye en la vegetación, que incluye bosques de coníferas en altitudes mayores y áreas agrícolas en los valles. La vegetación en las zonas más bajas puede dificultar o facilitar el acceso y la prospección de radar, dependiendo de su densidad.

4. Influencia en la Conservación de Estructuras Enterradas:

- Las condiciones geológicas y climáticas del CNT afectan la conservación de restos arqueológicos. En suelos volcánicos porosos y bien drenados, es posible que las estructuras se conserven relativamente bien. Sin embargo, la presencia de rocas duras y suelos altamente conductivos puede interferir con el radar, complicando la identificación de detalles finos en el subsuelo.
- Los valles y áreas planas entre montañas, como el Valle de México, han sido históricamente habitados y son ricos en sitios arqueológicos, pero están sujetos a la erosión y a movimientos del terreno que pueden afectar la preservación y la detección de restos.

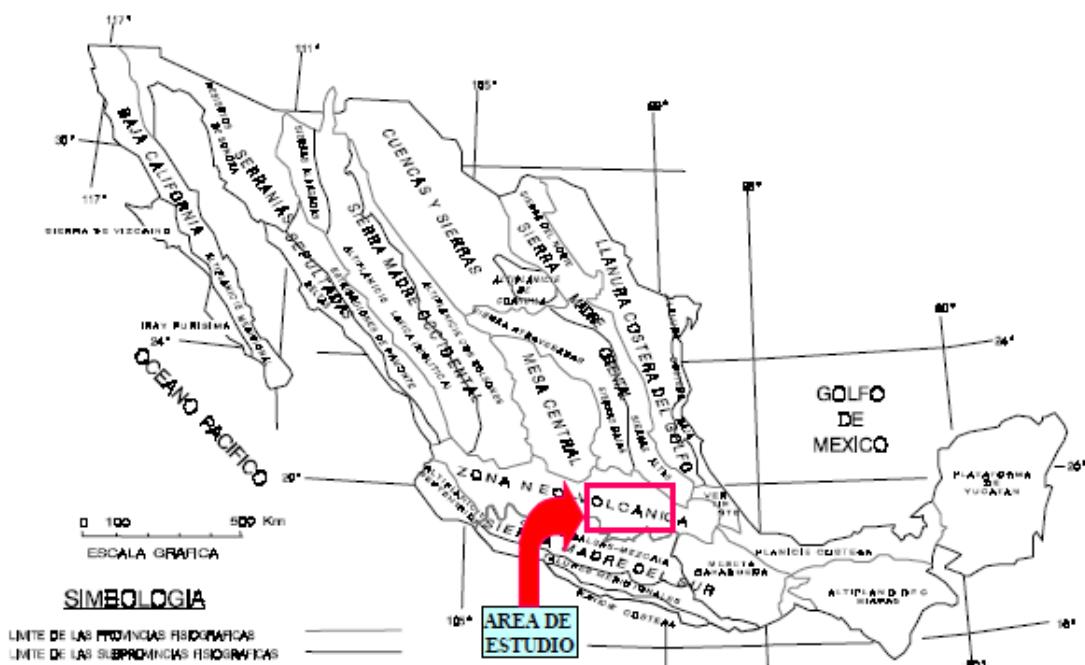


Ilustración 5. Este mapa muestra la zona fisiográfica en la que se encuentra la zona de estudio



Geología

Estratigrafía y Composición

La Cuenca de México, situada en el Altiplano Central de México, tiene una compleja historia geológica que ha influido significativamente en su estratigrafía y composición. Rodeada por montañas como la Sierra Nevada al este, la Sierra de las Cruces al oeste y la Sierra del Chichinautzin al sur, la cuenca estuvo originalmente compuesta por una serie de lagos endorreicos (sin salida al mar), que ocupaban gran parte del terreno y se alimentaban de los ríos provenientes de las montañas circundantes. Con el tiempo, la cuenca se transformó en un terreno lacustre de arcilla y sedimentos finos, formando capas que pueden facilitar la preservación de restos arqueológicos bajo ciertas condiciones.

En el siglo XV, la Cuenca de México se dividía en seis lagos principales: Texcoco, Chalco, Xochimilco, Xaltocán, San Cristóbal y Zumpango, con la Ciudad de México fundada en una zona insular en el Lago de Texcoco. La actividad humana, como la construcción de albarradones (diques) para controlar el nivel del agua, y los eventos geológicos naturales, incluyendo erupciones volcánicas y macrosismos, afectaron la estructura y la dinámica de estos cuerpos de agua, contribuyendo a cambios en la hidrología y el suelo de la región.

A lo largo de los siglos, el proceso de desecación de los lagos y el uso intensivo de los recursos hídricos han provocado un hundimiento considerable del suelo debido a la extracción de agua subterránea. Este fenómeno ha ocasionado también la dislocación de sistemas de drenaje y cambios en la composición de las capas de suelo. Los sedimentos arcillosos, remanentes del ambiente lacustre original, se han compactado, afectando la estabilidad del terreno y, en algunos casos, la visibilidad y conservación de los restos arqueológicos enterrados.

Esta particular estratigrafía del terreno, rica en arcillas y sedimentos finos, presenta tanto ventajas como desafíos para los estudios arqueológicos y geofísicos. Los materiales lacustres pueden preservar estructuras al crear capas estables, aunque la compactación y saturación de agua afectan la profundidad de penetración y la resolución del radar de penetración terrestre (GPR). Las características de estos suelos deben considerarse cuidadosamente para interpretar adecuadamente los resultados de la prospección y la detección de posibles estructuras o restos subterráneos.



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA

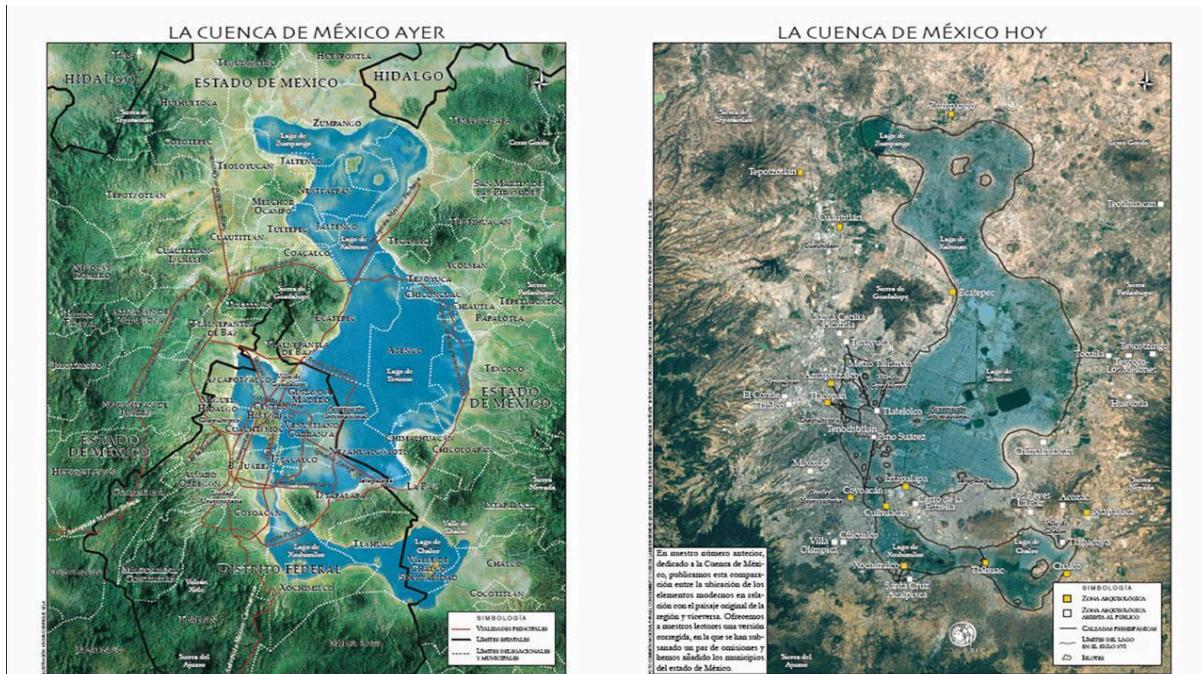
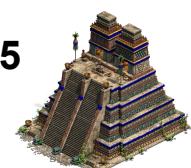


Ilustración 6. Comparación entre la cuenca hídrica de la Ciudad de México en el pasado y en la actualidad.



Geofísica

Introducción

El Radar de Penetración Terrestre (GPR, por sus siglas en inglés) es una técnica de exploración geofísica ampliamente utilizada en arqueología para identificar y analizar estructuras enterradas sin necesidad de excavaciones invasivas. Este método funciona enviando pulsos de ondas electromagnéticas al subsuelo y detectando sus reflexiones. Las variaciones en la señal reflejada pueden revelar la presencia de estructuras como muros, cimientos, canales o depósitos compactados, con aplicaciones exitosas en estudios arqueológicos previos. La metodología GPR permite una visualización no destructiva y detallada de los elementos subterráneos, ideal para la preservación y estudio de sitios arqueológicos.

Método de Radar de Penetración Terrestre (GPR)

Principios Físicos del Método

El GPR opera mediante la transmisión de ondas electromagnéticas al subsuelo a través de una antena. Cuando estas ondas encuentran materiales con distintas propiedades dieléctricas, como variaciones en la densidad, humedad o composición, parte de la energía se refleja de regreso a la superficie. Estas reflexiones son capturadas y registradas, generando un perfil de radargramas que permite inferir la ubicación y geometría de objetos enterrados o de cambios en las capas de suelo. La profundidad de penetración y la resolución de las imágenes obtenidas dependen de la frecuencia de la antena utilizada: frecuencias más altas ofrecen mejor resolución superficial, mientras que frecuencias más bajas alcanzan mayores profundidades.

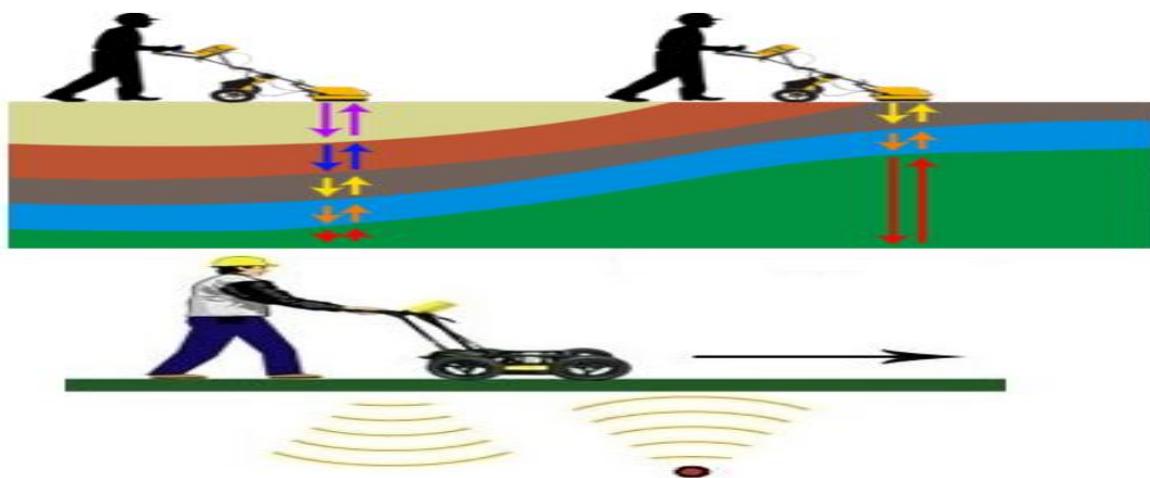


Ilustración 7. Ejemplo de adquisición de datos de GPR con una antena de radargrama



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA

Tipo de Arreglo Utilizado

Para este estudio, se utilizaron antenas de GPR con frecuencias de 600 MHz y 200 MHz. La antena de 600 MHz permite captar detalles con alta resolución en niveles superficiales, ideal para identificar elementos estructurales de tamaño medio o pequeño. Por otro lado, la antena de 200 MHz se utilizó para alcanzar mayores profundidades de exploración, sacrificando algo de resolución, lo que facilita una visión general de estructuras más grandes o profundas en el sitio. Esta combinación de frecuencias maximiza el rango de profundidad y la resolución, adaptándose a las características del terreno y los posibles objetivos arqueológicos.

Equipo Utilizado

Para poder llevar a cabo la adquisición de los datos se utilizó un equipo de la marca Leica, modelo DS 2000, está constituido por:

Tablet marca Leica Modelo CT2000

- Antena de frecuencia dual de 250 MHz y 700 MHz
- Cable inteligente ethernet, que permite la comunicación entre la Tablet y la antena.
- Carro de embalaje, para transporte y desplazamiento de la antena.
- Odómetro integrado al carro del embalaje para la obtención de la distancia del radargrama.



Ilustración 8. Ejemplo de georradargrama, obtenido de: <https://www.invesub.com.mx/gprdata.html>

Trabajos de Campo y Gabinete

Configuración de Mallas y Toma de Datos en Campo: Se realizaron tres mallas de exploración para cubrir distintas áreas del sitio:



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA

- **Malla 1:** Dimensiones de 14 x 7.5 metros, con espaciamiento entre líneas de 0.5 metros.
- **Malla 2:** Dimensiones de 12.5 x 8.5 metros, también con espaciamiento entre líneas de 0.5 metros.
- **Malla 3:** Originalmente tenía dimensiones de 8.5 x 7.5 metros, pero se realizó un alargamiento en las líneas 17 a 21, extendiéndolas hasta los 17 metros. Este ajuste permitió cubrir una extensión adicional que podría contener estructuras de interés.

En todas las mallas, el espaciamiento entre líneas de 0.5 metros fue cuidadosamente seleccionado para garantizar un muestreo adecuado y una buena resolución en los perfiles. Las mediciones se realizaron siguiendo líneas paralelas en cada malla, cubriendo el área de forma sistemática para obtener una representación precisa del subsuelo.

Procesamiento de Datos en Gabinete

El procesamiento de los datos adquiridos en campo fue esencial para transformar la información cruda en radágramas útiles para una interpretación precisa y confiable. El flujo de procesamiento se diseñó para optimizar la calidad de los datos y maximizar la identificación de estructuras subterráneas. Este proceso incluyó las siguientes etapas:

1. Corrección de Ganancia

Se aplicaron ajustes en la amplitud de las señales reflejadas para compensar la atenuación causada por la profundidad. Este procedimiento permitió mejorar la visibilidad de las capas profundas, asegurando que los datos fueran representativos de toda la extensión del subsuelo estudiado.

2. Filtrado de Ruido

Se utilizaron filtros especializados para reducir interferencias no deseadas en los datos:

- **Filtro de Alta Frecuencia:** Eliminación de ruido superficial.
- **Filtro de Baja Frecuencia:** Atenuación de las tendencias de fondo que pueden enmascarar las reflexiones significativas.
- **Filtros en Dominio del Tiempo y de la Frecuencia:** Para realzar reflejos específicos y mejorar el contraste de las estructuras de interés.

3. Migración de Datos

Se aplicó una migración para corregir la posición aparente de los reflejos y colocar las anomalías en su ubicación verdadera dentro del subsuelo. Esto eliminó distorsiones y mejoró significativamente la definición lateral de las estructuras detectadas, proporcionando imágenes más nítidas y confiables.

4. Corrección de Tiempo Cero



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA

El ajuste del inicio de las reflexiones permitió alinear los radargramas a una base de tiempo común, garantizando una interpretación precisa de las profundidades de las estructuras detectadas.

5. Interpolación y Kriging

Para lograr una representación tridimensional del subsuelo, se utilizó el método de kriging, que permitió interpolar los datos de amplitud entre las mallas estudiadas. Este proceso generó cortes horizontales y mapas de profundidad con alta resolución.

Parámetros utilizados en el kriging:

- **Modelo de variograma:** Esférico, adaptado a la naturaleza de las reflexiones geofísicas.
- **Rango:** 5 metros.
- **Resolución de grilla:** 0.5 metros.
- **Radio de búsqueda:** 10 metros.

Estas configuraciones aseguraron una interpolación precisa, respetando las características locales del subsuelo y minimizando artefactos en los resultados.

6. Análisis de Textura

Se realizó un análisis de textura para evaluar las propiedades físicas del subsuelo, empleando parámetros clave:

- **Contraste:** Este parámetro permitió identificar zonas de alta variabilidad dieléctrica, destacando materiales heterogéneos y posibles estructuras enterradas.
- **Homogeneidad:** Este análisis facilitó la delimitación de áreas con propiedades físicas uniformes, correlacionadas con sedimentos homogéneos o materiales naturales.

El análisis de textura se integró con los resultados del kriging para mejorar la interpretación espacial de las zonas de interés.



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA

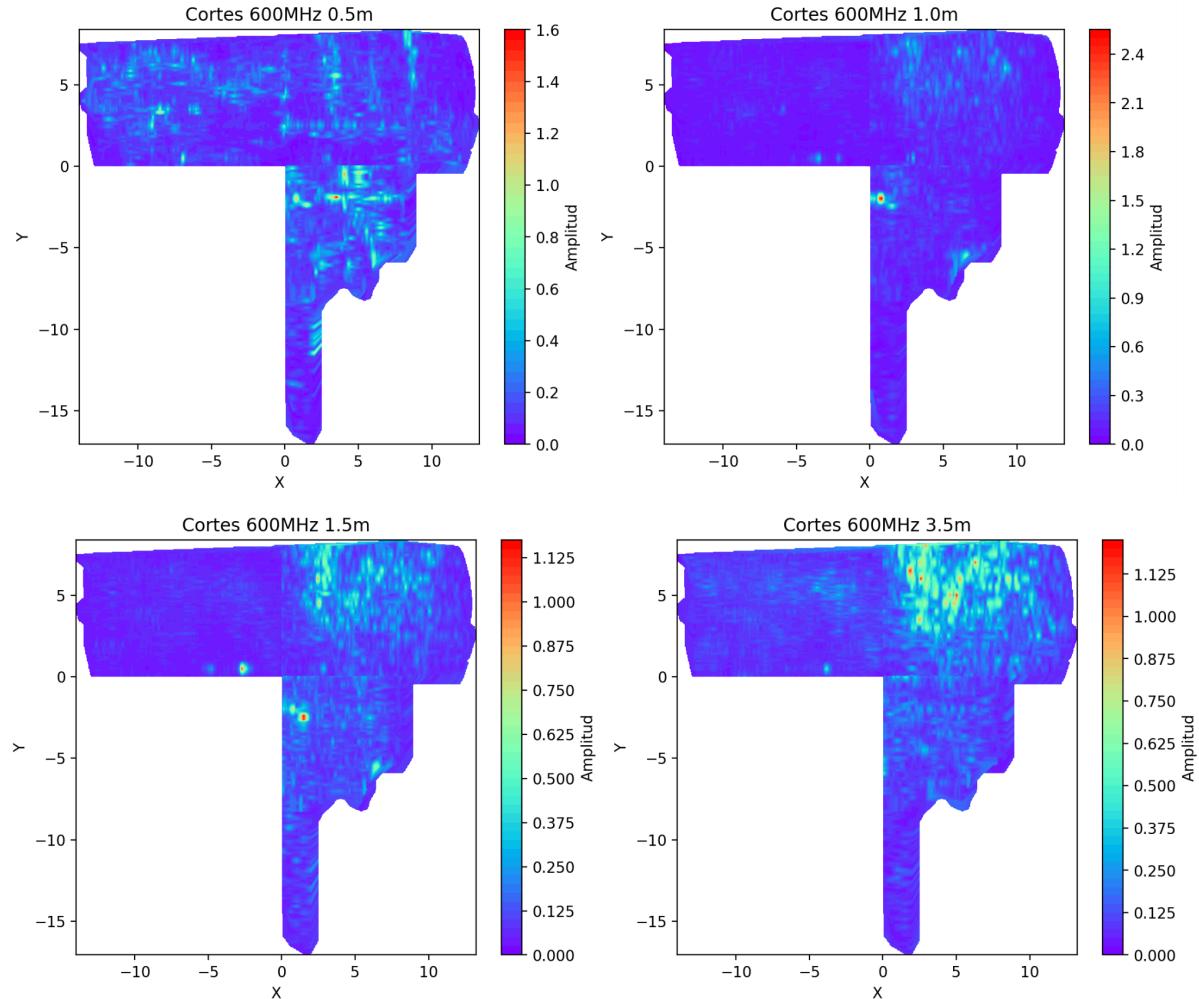


Ilustración 9. Cortes interpolados en python, con distancia máxima de interpolación ajustada. Se observa como los reflectores van surgiendo en la malla 2 a los 3.5 metros de profundidad. Elaboración propia.



Interpretación de Datos Geofísicos

Interpretación Cualitativa

Se realizó un análisis detallado de las imágenes y secciones obtenidas mediante el estudio de Radar de Penetración Terrestre (GPR). El objetivo fue identificar anomalías que pudieran indicar la presencia de estructuras antiguas, materiales inusuales o zonas de interés geofísico. Para este análisis, se procesaron tres mallas de forma independiente, y posteriormente, se efectuó una interpolación conjunta para mejorar la resolución espacial a lo largo del área estudiada.

Resultados por profundidad:

0.5 metros de profundidad:

En esta profundidad, las tres mallas muestran un comportamiento homogéneo en la mayoría de las áreas. No obstante, se destacan amplitudes relativamente altas en la malla 3. Estas anomalías podrían reflejar materiales con mayor capacidad reflectiva, como restos de estructuras enterradas o elementos con propiedades dieléctricas diferentes.

Estadísticas principales:

- Media: 0.151
- Máximo: 1.771
- Percentil 75%: 0.184

1 metro de profundidad:

Se observa una disminución en las amplitudes generales. Sin embargo, las amplitudes más altas continúan concentrándose en la malla 3, en particular cerca de la pared. Este comportamiento podría estar relacionado con la presencia de reflectores potentes, como placas enterradas o materiales metálicos que causen altas reflexiones.

Estadísticas principales:

- Media: 0.139
- Máximo: 2.608
- Percentil 75%: 0.166

1.5 metros de profundidad:

A esta profundidad, la malla 3 sigue presentando las mayores amplitudes, pero ahora se observan reflectores más grandes en la malla 2. Estas características podrían estar asociadas con cambios en las propiedades dieléctricas o la presencia de capas geológicas más heterogéneas.

Estadísticas principales:

- Media: 0.109



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA

- Máximo: 1.185
- Percentil 75%: 0.133

3.5 metros de profundidad:

Se detectan reflectores potentes en la malla 2, con una concentración notable hacia la parte sur del levantamiento. Este patrón puede estar relacionado con estructuras enterradas o materiales específicos que modifican el comportamiento de la señal GPR.

Estadísticas principales:

- Media: 0.151
- Máximo: 1.267
- Percentil 75%: 0.172

Interpretación Cuantitativa

El análisis cuantitativo de las amplitudes refleja una variación significativa en las propiedades dieléctricas del subsuelo, que podrían correlacionarse con la existencia de materiales heterogéneos o estructuras enterradas. Estas diferencias de amplitud en función de la profundidad se interpretan como indicativas de la composición y la estratigrafía subyacentes.

Interpretación de zonas de baja amplitud:

1. Suelos compactados homogéneos:

Áreas donde el terreno ha sido compactado de forma uniforme, limitando la reflectividad del radar debido a la ausencia de discontinuidades internas.

2. Materiales de baja conductividad:

Depósitos sin grandes contrastes dieléctricos internos, posiblemente sedimentos naturales o rellenos sin estructuras significativas.

3. Espacios vacíos o materiales conductivos:

Podrían corresponder a zonas con alta humedad o contenido conductor, atenuando la señal de radar.

Interpretación de zonas de alta amplitud:

Las áreas con amplitudes elevadas son indicativas de materiales con mayor reflectividad dieléctrica, como objetos metálicos, rocas densas o estructuras enterradas. En particular:

- **Malla 3:** Recurrentes anomalías cercanas a la superficie y hasta 1.5 metros de profundidad.
- **Malla 2:** Concentración de reflectores a 3.5 metros, en la parte sur del área.

Interpretación Final



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA

El estudio con GPR permitió identificar diversas características geofísicas relevantes:

1. Las zonas de baja amplitud reflejan áreas homogéneas, posiblemente compactadas o con baja variabilidad dieléctrica, sugiriendo que estas áreas pueden descartarse como puntos prioritarios para excavación.
2. Las zonas de alta amplitud, concentradas en las mallas 3 y 2, presentan características compatibles con la presencia de estructuras enterradas o materiales con contrastes dieléctricos significativos, constituyéndose como áreas de interés arqueológico o geofísico.
3. Los cambios observados a distintas profundidades confirman la necesidad de un análisis estratigráfico detallado para correlacionar los resultados con las condiciones geológicas locales.

Este enfoque integral combina métodos cualitativos y cuantitativos para lograr una interpretación precisa y robusta del subsuelo investigado.

Resultados de los Estudios Geofísicos

Validación de Resultados

Se realizó una comparación exhaustiva entre las anomalías detectadas mediante GPR y los registros históricos del sitio, incluyendo mapas antiguos y estudios previos. Estas fuentes ayudaron a contextualizar los hallazgos geofísicos dentro de la historia del área, validando las interpretaciones preliminares y facilitando la identificación de estructuras significativas.

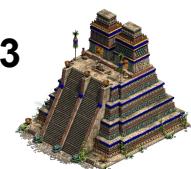
El análisis comparativo destacó la correlación entre las reflectividades observadas y las posibles estructuras arquitectónicas antiguas, como cimientos o canales, particularmente en las mallas 2 y 3. Esta validación refuerza la confiabilidad del GPR como herramienta para planificar la construcción de la bodega sin comprometer el patrimonio histórico.

Interpretación Arqueológica

El estudio permitió interpretar las características detectadas de manera arqueológica:

1. Cimientos y restos arquitectónicos:

Anomalías en la malla 3, a profundidades de entre 0.5 y 1.5 metros, sugieren la presencia de cimientos que podrían corresponder a edificaciones antiguas.



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA

2. Canales antiguos:

Los reflejos potentes en la malla 2, concentrados a profundidades de hasta 3.5 metros, podrían ser trazas de antiguos sistemas hidráulicos utilizados en el sitio.

3. Materiales homogéneos:

Áreas de baja amplitud, presentes en las tres mallas, indican zonas con menor potencial arqueológico y alta probabilidad de estar compuestas por sedimentos homogéneos.



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA



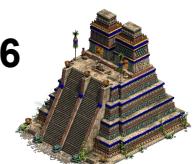
Ilustración 10. Anomalía en la malla 3, corte a los 0.5 metros de profundidad, se muestran amplitudes altas, georreferenciado en QGIS, elaboración propia



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA



Ilustración 11. Anomalía en la malla 3, corte a los 1.5 metros de profundidad, se muestran amplitudes altas, georreferenciado en QGIS, elaboración propia



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA



Ilustración 12. Anomalía en la malla 2, corte a los 3.5 metros de profundidad, se muestran amplitudes altas, georreferenciado en QGIS, elaboración propia

Estos resultados proporcionan una interpretación preliminar robusta para planificar la ubicación de la bodega subterránea en áreas seguras, evitando daños a posibles restos arqueológicos.



Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones Iniciales

Los hallazgos principales del estudio incluyen:

- La detección de posibles cimientos en la malla 3, que podrían representar restos de edificaciones históricas.
- La identificación de canales subterráneos en la malla 2, que destacan como posibles elementos hidráulicos antiguos.
- La delimitación de zonas homogéneas, libres de contrastes dieléctricos significativos, que representan áreas seguras para la construcción.

Estos resultados aseguran una base científica sólida para tomar decisiones informadas sobre el diseño de la bodega subterránea, respetando el patrimonio arqueológico y minimizando riesgos.

Recomendaciones para Excavación

Para garantizar una intervención segura y precisa, se proponen las siguientes áreas prioritarias para excavación:

Malla 3:

- Anomalías detectadas a profundidades de entre 0.5 y 1.5 metros, correspondientes a posibles cimientos.

Malla 2:

- Reflectores en el sur de la malla, a 3.5 metros, asociados con canales antiguos.

La excavación en estas áreas permitirá confirmar la naturaleza de las estructuras detectadas y definir los límites de las zonas de protección arqueológica.

Propuestas para Estudios Complementarios

1. Análisis con técnicas geofísicas adicionales:

- Uso de magnetometría o resistividad eléctrica para corroborar las anomalías detectadas y obtener información adicional sobre la composición del subsuelo.

2. Ampliación del área de estudio:

- Realizar investigaciones en las áreas adyacentes para comprender la extensión de las estructuras detectadas.

3. Estudios históricos más detallados:



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA

- Profundizar en la revisión de mapas y documentos históricos para afinar la interpretación de los hallazgos y su contexto cultural.

Estas acciones complementarias contribuirán al diseño preciso de la bodega, asegurando la protección del patrimonio y optimizando el uso del terreno disponible.



Bibliografía

- Tenochtitlan: Thomas Kole. (s.f.). *New Fire Ceremony*. Disponible en: <https://tenochtitlan.thomaskole.nl/es.html>
- Cervera Obregón, M. A. (2007). *Breve Historia de los Aztecas*. México: Editorial Océano de México.
- La UNAM te explica: La historia hidrológica de la Cuenca de México: <https://www.fundacionunam.org.mx/ecopuma/la-unam-te-explica-la-historia-hidrologica-de-la-cuenca-de-mexico/>
- Coe, M. D., & Koontz, R. (2008). *From the Olmecs to the Aztecs*. New York: Thames & Hudson.
Michael D. Coe es Profesor Emérito de Antropología en la Universidad de Yale y autor de numerosas publicaciones, incluyendo la obra *The Maya*. Rex Koontz es Director de la Escuela de Arte y Profesor de Historia del Arte en la Universidad de Houston, donde ha publicado extensamente sobre el arte, la arquitectura y la estética del México antiguo.
- Kurella, D., Berger, M., & de Castro, I. (Eds.). (2009). *Aztecs*. En colaboración con el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), México.

