

Resolución acústica en edificaciones en Yucatán y Chiapas

Resumen: El objetivo de esta investigación fue probar la acústica de varias estructuras arquitectónicas en la región de Yucatán y Chiapas para establecer las correspondencias en las frecuencias de resonancia grabadas. Se utilizó el “ruido blanco”, el “ruido rosa” y las ondas sinusoidales del “tono de barrido”, para determinar el dominio de las frecuencias que resuenan dentro de las pirámides, de las estructuras ceremoniales y de los patios en Palenque, Oxkintok, Uxmal, Kabah y Chichén Itzá. La resonancia de las estructuras de las áreas estudiadas no había sido analizada en su totalidad con procesos digitales avanzados antes. Este artículo resume varios años de estudio (de 1999 a 2003), durante los cuales se desarrollaron métodos *ad hoc* para capturar los sonidos reverberantes haciendo uso de micrófonos electrónicos Neumann de alta calidad, además de realizar un análisis comparativo (2004-2009). Se presentan en este trabajo los perfiles de cada sonido musical y su relación señal-ruido, en varios recintos de Yucatán y Chiapas.

Palabras clave: maya, resonancia, ruido rosa, ruido blanco, tonos de barrido.

Abstract: The objective of this research was to test the acoustics in various architectural structures in the Yucatán and Chiapas region to establish correspondences in recorded resonance frequencies. “White noise,” “pink noise” and sine waves of “tone sweep” were used in this research to determine the domain of frequencies that resonate within pyramids, ceremonial structures, and patios in Palenque, Oxkintok, Uxmal, Kabah, and Chichén Itzá. Prior to this work, the resonance of the structures in the study areas had not been fully analyzed using advanced digital processing. This article summarizes several years of study (1999 to 2003), during which ad hoc methods were developed to capture the reverberating sounds using Neumann high quality electronic microphones, in addition to a comparative analysis (2004–2009). Profiles of each musical sound and its noise-signal ratio in a number of precincts in Yucatán and Chiapas are presented in this paper.

Keywords: Maya, resonances, white noise, pink noise, sine wave “sweep tones”.

Para investigar las frecuencias de resonancia acústica integradas en la arquitectura piramidal y en los templos de Yucatán y Chiapas se ha considerado que el diseño arquitectónico de los edificios ceremoniales de los mayas pudo haber estado configurado en frecuencias sonoras específicas. La hipótesis de esta investigación —realizada durante cinco años— es que los espacios dentro de las pirámides y de los templos de la zona mencionada fueron construidos con base en el conocimiento del significado de las frecuencias sonoras, para lo cual se utilizaron materiales de construcción específicos (Coe, 1966; Barrera y García, 2011).

En occidente, la construcción de iglesias, templos y mezquitas se determina bajo ciertas consideraciones, una de las cuales es la importancia de sus propiedades acústicas. Ciertas tradiciones musicales se han desarrollado de acuerdo

* Academia para Ciencia Futura, A. C.

** Ingeniero de sonido independiente.

*** Universidad Autónoma Metropolitana.

con estas estructuras arquitectónicas —por ejemplo, los cantos gregorianos—. Aun cuando en Mesoamérica faltan pruebas rigurosas de las formas musicales y sonoras específicas, sostenemos que los antiguos mayas establecieron su espectro sonoro a partir de los sonidos de los rituales que resonaban en las paredes de las cámaras de sus templos (Both, 2008; Lubman, 2002; Carrera y Beristáin, 2002). En varios rituales y ceremonias la música cumplió un papel significativo, como se evidencia en las pinturas, artefactos y crónicas españolas (Bourg, 2005; Flores, 1997; Garza *et al.*, 2008).

En las investigaciones se analizó el espectro sonoro de la estructuras arquitectónicas de las regiones de Yucatán y Chiapas, susceptibles de tener una naturaleza sonora bien definida, y se establecieron las correlaciones de las frecuencias acústicas dentro de las habitaciones.

Mediante el uso de *hardware* para sonido digital se realizaron análisis específicos de las diferentes estructuras en Palenque, Oxkintok, Uxmal, Kabah y Chichén Itzá. Se analizaron, sobre todo, las estructuras cerradas, pero también se probaron algunos ambientes abiertos y semiabiertos. En las áreas abiertas, las ceremonias relacionadas con las plegarias ritualistas permitían a los centros funcionar como anfiteatros abiertos, junto con las pirámides o compartimentos, como parte del ambiente sonoro (Pearce, 1984; Lawler, 2012). En las áreas abiertas y en las cámaras cerradas se estableció la hipótesis de que hay una firma acústica en el diseño de la arquitectura de las escaleras, pasillos, patios y cuartos rectangulares.

Se registraron digitalmente las muestras de sonidos obtenidos en los centros ceremoniales mediante el uso de Pro Tools en una computadora Macintosh y el DAT (*digital audio tape*, cinta de audio digital). Para el análisis de las frecuencias, realizado en PC, se utilizaron programas como Sony Sound Forge y un complemento (*plugin*) llamado Steinberg Waves. Se utilizaron estos sistemas y programas, para determinar si existían frecuencias acústicas recurrentes en los complejos sociales-ceremoniales y para verificar si las estructuras implican cualquier superposición o armonización consistente en los diferentes sonidos utilizados.

El estudio de la resonancia debe ser entendido como un estudio de vibración armónica creada cuando una fuerza conducida externa periódica (sonido) alcanza una frecuencia de oscilación natural libre (onda estacionaria) y produce potentes patrones de resonancia que resultan de la reflexión del sonido dentro de la estructura (Pérez *et al.*, 2001). Dentro de las edificaciones existen ciertos sonidos que son como una firma vibratoria, que determinan los niveles específicos de resonancia. Así fue como se evaluó la estructura sonora de la arquitectura, de la forma de los templos y de las cámaras.

Para realizar el presente estudio se utilizaron frecuencias que oscilan entre 20 Hz y 20 kHz que corresponden al barrido 1, pues se considera que son equivalentes a los de un tenor masculino. La voz de un varón oscila entre 125 Hz y 225 Hz, pero al cantar puede llegar hasta 3000 Hz (Meyer, 2009), si se considera que podría equivaler a los sonidos producidos por un sacerdote maya en el pasado, suponiendo que el sacerdote maya hubiera estado ubicado en el centro del recinto o cerca de la entrada al edificio. Sin embargo, estamos interesados en hacer estudios de sonido más extensos en el futuro, relacionados con la voz humana y con otros instrumentos mayas antiguos.

Se determinó también la mejor resonancia y la reacción de las edificaciones. Las señales sonoras provenientes de las paredes de los cuartos inducían a los participantes a ser parte de las fuerzas discretas de la vibración, actuando de manera conjunta como instrumentos musicales generando sonidos orquestados. En principio es posible analizar los patrones modales y las correspondientes frecuencias de resonancia de las configuraciones de los recintos y de los materiales, como el estuco de piedra caliza utilizada en su construcción.

Metodología

A través del análisis de la señal en tres dimensiones se determinaron los efectos de las armonías y de los patrones de interferencia, para proporcionar una mejor comprensión de la resonancia de los templos, y se determinó también que había una

consistencia o patrón en las frecuencias de resonancia.

Se realizaron dos expediciones para registrar la acústica de los sitios estudiados. El primer viaje, considerado una expedición preliminar, fue del 23 al 29 de octubre de 1999, y se utilizó el equipo Sony Pro DAT para registrar los sonidos. El segundo viaje se realizó del 4 al 9 de noviembre de 2003, en el cual se utilizó el *software* Pro Tools en una computadora portátil Macintosh G4, y de nuevo el Sony Pro DAT para registrar los sonidos.

La mayoría de las edificaciones se analizaron dos veces, a excepción de Palenque, zona que estaba en restauración cuando se realizó el segundo viaje, por ello los datos registrados corresponden a los obtenidos en el primer viaje, de 1999.

Para el estudio se consideró pertinente tener ruido de banda ancha, se hizo uso del “ruido blanco” (abarcando varias frecuencias de la misma intensidad en el rango audible de 20 Hz a 20 kHz), del “ruido rosa” (similar al ruido blanco, aunque el poder del sonido disminuye a medida que la frecuencia aumenta) y de los “barridos de excitación” del sonido.

El ruido blanco es un ruido cuya amplitud es constante en toda la gama de frecuencias audibles, todas con la misma potencia y sus valores de señal en dos tiempos diferentes no guardan correlación estadística; al ser la densidad espectral de potencia una constante, se produce con un generador de ruido aleatorio en el cual todas las frecuencias son igualmente probables.

Considerando que el ruido blanco se define como el sonido con la misma potencia por hercio de frecuencia, el ruido rosa se filtra para dar igual potencia por octava, o igual potencia por 1/3 de octava. Puesto que el número de hercios en cada octava sucesiva aumenta por dos, esto significa que la potencia de ruido rosa por hercio de ancho de banda disminuye en un factor de 2-3 decibelios por octava.

El ruido blanco sonaría como un silbido plano y el ruido rosa, al poseer relativamente más graves que el ruido blanco, suena de forma semejante al estruendo de una cascada.

Un barrido de tono se define como el recorrido de una frecuencia a otra, y en ocasiones regresa a la frecuencia original, como si fuera un ciclo.

La vibración más simple es la senoidal. Las ondas senoidales, como su nombre indica, son vibraciones que tienen la forma de tales ondas. Los principales parámetros son amplitud, frecuencia, número y rango de barridos.

Para ambas expediciones se estableció una caracterización comparativa de las frecuencias de resonancia, sobre todo en los cuartos que han mantenido sus estructuras originales. Algunos compartimentos dentro de las edificaciones han sido reconstruidos con materiales modernos o con estuco, los cuales no reproducen la misma resonancia que producen los materiales de construcción originales. Sin embargo, la Pirámide del Adivino en Uxmal fue restaurada con sus piedras y mortero originales, y si bien los patrones de resonancia obtenidos en 2003 fueron diferentes a los obtenidos en 1999, en nuestra opinión esto se atribuye a que la primera caracterización fue registrada sin restauración y la segunda caracterización se llevó a cabo en 2003, una vez concluido el proceso de restauración.

Se reconoce que las ligeras variaciones en las frecuencias de resonancia naturales de un sitio a otro están determinadas con base en la edad de las estructuras y el cambio potencial en las paredes, techos y pisos que pueden causar variaciones en la precisión de la resonancia original. Aunque los estudios no se incluyeron en este reporte, las líneas de exploración quedan abiertas para un análisis futuro que comprenda un muestreo de los instrumentos musicales del México antiguo, incluida la voz humana.

Además de la generación de la señal electrónica, se incluyeron otros instrumentos musicales (entre ellos cuenco, pipa de arcilla, flauta y voz), en un intento por definir más la resonancia musical de ciertas cámaras (Zhang *et al.*, 1999: 366-367); estos resultados se presentarán en un reporte posterior.

Marco arqueológico

A pesar del cambio en los gobernantes reales y en las asociaciones tribales de Yucatán y Chiapas (Thompson, 1966; Von Hagen, 1960), la arquitectura del periodo Clásico sobrevivió en su estilo,

teniendo a las pirámides, templos, edificios administrativos y juegos de pelota como características estándar. Las ciudades mayas pudieron haber sido diseñadas de manera independiente; sin embargo, las une un estilo arquitectónico y, como se indicará más adelante, también las estructuras sonoras que crean un paisaje de sonido ceremonial cohesivo (Buckley, 1989). Esto no es una idea inverosímil, ya que, por ejemplo, Tikal significa el “lugar de las voces” (o de las lenguas), y se refiere al lugar del sonido. Así, el entorno cultural de los mayas se extiende de Palenque y Tikal (región de Petén en Guatemala) al sur, a un conjunto de ciudades al norte de la península de Yucatán.

En las paredes exteriores de los templos, como en Kabah, se muestran los mascarones del dios Chac (fig. 1) como parte del arte pictográfico. Aunque algunos creen que los círculos de los mascarones representan los ojos, el dentado debajo de los ojos también podría representar una boca abierta con la lengua, como un símbolo del sonido (Ferguson *et al.*, 1977). Al observar cuidadosamente los detalles en las imágenes de las fachadas en las cámaras de Kabah, el arqueólogo puede notar el profundo significado simbólico del sonido que se encuentra en los relieves de los seres poderosos que gobernaron los tres niveles del cosmos maya.

Varios de los sitios visitados son ejemplos de la arquitectura de la ruta Puuc, como Uxmal (Kowalski, 1999). Los edificios de esta región cuentan con una sección inferior plana y una sec-



© Fig. 1 Kabah, Mascarones de Chac o Codz Poop.

ción superior decorada. Las decoraciones son por lo general representaciones de serpientes y dioses como Chac, dios de la lluvia. Las construcciones Puuc tienen paredes cementadas llenas de escombros y una fina capa de piedra decorada (Ferguson y Adams, 2001). En general, los materiales de construcción maya consistían en 1) núcleo seco (con relleno de rocas de piedra sueltas aglutinadas), 2) capas de bloques de piedra caliza que cubrían los intersticios con suelos arcillosos marrón y mampostería, 3) piedra (por lo general ladrillos cubiertos originalmente con estuco). Cuando la piedra caliza no fue utilizada en las restauraciones, se detectó un cambio en las frecuencias del sonido, por tanto, se deduce que la resonancia no radica tan sólo en las formas ni en las dimensiones de las habitaciones, sino quizá en los materiales de construcción utilizados en las mismas.

Diseño y equipo experimental

Antes de la expedición de 1999 los autores de este trabajo visitaron la mayoría de los sitios varias veces y se percataron de la resonancia acústica de los templos y de otros centros ceremoniales. Después solicitaron a los musicólogos Jason Stelzel y Fritz Heede que los acompañaran a hacer grabaciones preliminares. En 2003, Alan Howarth, diseñador e ingeniero de sonido, los acompañó para realizar un análisis más amplio, tratando de encontrar una evidencia sustancial y una línea de base.

Para evaluar la relación entre la arquitectura y el panorama sonoro de las pirámides se presentó de manera oportuna un protocolo de trabajo, mismo que fue aprobado por el INAH; para utilizar equipos de pruebas de sonido en sitio, Jason Stelzel fue el ingeniero responsable de la primera serie de investigaciones y Alan Howarth el responsable de la segunda.

Los sitios visitados se detallan en la tabla 1, ordenada de acuerdo con la realización de la investigación. Para la reproducción y la grabación del sonido se utilizaron: un equipo Sony pro-DAT en la prueba de tonos, un par de micrófonos de condensador estéreo Neumann SKM 140 (expedición 1) y Neumann KM 84 (expedición 2) y un

Tabla 1 Análisis espectral maya

Análisis espectral según maya		Domino de la frecuencia	Domino de la frecuencia	Domino de la frecuencia	Domino de la frecuencia	Domino de la frecuencia	Domino de la frecuencia	Domino de la frecuencia	Domino de la frecuencia	Domino de la frecuencia	Domino de la frecuencia	Domino de la frecuencia	Domino de la frecuencia	Domino de la frecuencia
	Ruido blanco		Ruido rosa		Barrido 1		Barrido 2		Barrido 3					
Fuente					20-20 KHz		20-20 KHz		20-200 Hz					
Registros Obtenidos	Hz	Nota	Hz	Nota	Hz	Nota	Hz	Nota	Hz	Nota	Hz	Nota	Hz	Nota
Palenque														
El Palacio	Corredor arco Corbel		259	C4 -17	302	D4	172	F3-26	65	C2 -11				J
Casa A	Interior derecho (en forma de cerradura)		237	A#3 +29	259	C4 -17	172	F3-26	86	F2-26				J
Casa A	Interior izquierdo (en forma de cerradura)		151	D#3 +48	259	C4 -17	172	F3-26	86	F2-26				J
Templo de las Inscripciones	Inscripciones: superior central		259	C4 -17	259	C4 -17	129	C3-24	65	C2 -11				J
Templo de las Inscripciones	Inscripciones: cámara interior- lumbas de Pakal		237	A#3 +29	259	C4 -17	172	F3-26	86	F2-26				J
Templo XIII o de la Reina Roja	Sarcófago monolítico		216	A3-32	302	D4	129	C3-24	65	C2 -11				J
Oxkinok-Tzot-Tun Tzot														
	Laberinto, cámara del segundo nivel en la entrada central		194	G3 -18	194	G3 -18	172	F3-26	194	G3 -18				J
	Laberinto, cámara del segundo nivel en la entrada central	216	A3-32	F#2 +28	280	C#4	86	F2-26	43	F1-26	65	C2 -11		AH
	Laberinto, pasillo en la planta baja junto a la escalera		216	A3-32	216	A3-32	216	A3-32	86	F2-26				J
Uxmal														
	Pirámide del Adivino, Templo II-Expedición 1		194	G3 -18	259	C4 -17	237	A#3 +29	194	G3 -18				J
	Pirámide del Adivino, Templo II-Expedición 2	108	A2-32	A2-32	345	F4	453	A#5	65	A2-32	108	C2 -11	65	AH
	Cuadrángulo de las Monjas -exterior	117	A#2 +7	A#2 +7	258	C4 -24	141	C#3 +30	47	F#1 +28				AH

	Cuadrángulo de las Menijas, La Residencia-lado norte superior, 4a. Cámara al este	216	A3-32	141	C#3+30	164	E3							47	F#1+28			AH
	Cuadrángulo de las Menijas Cámara 1 -lado norte superior, 3a. cámara al oeste			268	C4-24	259	C4-17							86	F2-26			J
	Palacio del Gobernador (orientado al este, la 6a. habitación al sur)			194	G3-18	172	F3-26							86	F2-26			J
Kabiab																		
Coöz Poop	Fachada oeste o de los Mascarones - cámara central (cámara exterior)			216	A3-32	259	C4-17							86	F2-26			J
	Fachada oeste o de Los Mascarones - cámara central (cámara interior)			259	C4-17	302	D4							86	F2-26			J
	Fachada oeste o de Los Mascarones - cámara central (cámara exterior)	258	C4-24	117	A#2 +7	352	F4	352	F4 +14				117	A#2 +7	F#1+28	47	C2-11	AH
Chichén Itzá																		
	Punto intersecante pirámido exterior (entre el templo del Jaguar, la plataforma de Venus y la pirámide de Kukulcán)			216	A3-32	216	A3-32							86	F2-26			J
	El Castillo Kukulcán - Templo superior			194	G3-18	108	A2-32							86	F2-26			J
	El Castillo Kukulcán - interior (cámara interior, Trono del Jaguar) - Expedición 1			216	A3-32	216	A3-32							86	F2-26			J
	El Castillo Kukulcán - interior (cámara interior, Trono del Jaguar) - Expedición 2	117	A#2 +7	117	A#2 +7	469	A#4	117	A#2 +7				117	A#2 +7	F#1+28	117	A#2 +7	AH
	Casa Colorada			280	C#4-18	259	C4-17							172	F3-26			J
	Akab Dzib			237	A#3 +29	151	D#3 +48							65	C2-11			J

* AH = Alan Howarth, J = Jason Stetzel



○ Fig. 2. Expedición 2. Cuadrángulo de las Monjas (exterior).

altavoz omnidireccional encendido. En las expediciones 1 y 2 se utilizaron dos micrófonos para registrar más datos de nodos acústicos. En la expedición 1 se usó también una bocina de Roland Battery Operated Field Amplifier, y en la expedición 2 (fig. 2) se utilizó una bocina bidireccional de potencia de anclaje Explorer PB2500, un oscilador de onda de frecuencia variable y un CD de audio de prueba estándar que contiene tonos estándar y generación (excitación) de ruido (ruido blanco y ruido rosa), un sistema de reconocimiento de campo portátil para lecturas rápidas in situ, un medidor de nivel de presión acústica y una computadora portátil Macintosh G4 equipada con una interfaz M-Box y ProTools 6.1.2.

Se utilizó una cámara de video para realizar el mapeo del diseño del piso y de las elevaciones del techo, así como un láser. Para obtener una grabación típica, la fuente de sonido fue colocada en el piso de la recámara y los micrófonos en trípodes cortos, aproximadamente al centro de la habitación o sala de configuración. La misma metodología fue utilizada en trabajos en Egipto (Adel-Rahman, 1991: 181-187).

En este trabajo se incluyen 24 registros, que corresponden a cerca de 10% de los registros realizados en las cámaras, habitaciones y puntos muestreados; sin embargo, la mayoría de los registros mostraron resultados similares a pesar del tiempo transcurrido entre ambas. La excepción, como ya se dijo, fueron los registros en la Pirámi-

de del Adivino en Uxmal, y es atribuible a la restauración de la misma. Se determinó también que la resonancia de las habitaciones y de las cámaras no fue afectada por la ubicación de los micrófonos (en el piso, al centro de la habitación o en el techo). Colocarlos a una distancia de 50 cm de las paredes o techos permite que una onda estacionaria pueda ser generada por el reflejo ondular en las paredes de las cámaras.

Cada sesión de pruebas inició con la excitación del ruido rosa seguida por “barridos de tono” de onda senoidal o sinusoidal estandarizados entre 20 y 20kHz.

Se muestran tres rangos de barrido cuyas frecuencias oscilan desde el rango audible más bajo de 20Hz hasta el más alto de 2kHz. La excitación del sonido en el barrido 1 oscila entre 20Hz y 20kHz, el barrido 2 entre 20Hz y 2kHz (que termina poco antes del barrido 1) y el barrido 3 entre 20 y 200Hz (éste se mantiene en las frecuencias bajas). Para el análisis espectral del sonido se utilizó la transformada rápida de Fourier y se ajustó la resolución a 2048 divisiones de frecuencia.

En la expedición 2 también se realizaron pruebas haciendo uso del ruido blanco. El ruido rosa se pondera porque tiene la misma energía en todas sus frecuencias y proporciona una “respuesta plana”. Esta característica se toma en cuenta para realizar el registro inicial en el cuarto que se elija para la prueba.

En el curso de la grabación, las crestas y los valles resultantes de la frecuencia de resonancia muestran las ondas estacionarias naturales de cada espacio acústico in situ. Y para obtener información adicional se utilizaron los barridos de tono.

También se usaron niveles consistentes de reproducción para generar los tonos en el rango de 95-100dB. En algunos casos se utilizaron técnicas de grabación en estéreo. Todos estos datos sin procesar fueron analizados en el laboratorio vía los programas Sound Forge 7.0 y WaveLab. Durante las grabaciones de la acústica de los diferentes lugares solamente el ingeniero de sonido estaba dentro de la habitación objeto de la muestra, mientras los otros investigadores permanecieron en el exterior.

Aunque en la antigüedad había probablemente más de un individuo en el cuarto, a pesar de la pre-

sencia de una sola persona, la resonancia de la habitación se mantenía. La mayoría de esos cuartos son lo bastante grandes como para que los resultados no se vean afectados por la presencia de tres o incluso cinco personas. Sin embargo, la presencia de una sola persona en la habitación permite una grabación más limpia de las ondas estacionarias. De esta manera reconocemos que la presencia de demasiados investigadores en las cámaras podría modificar las frecuencias de resonancia y aportar mediciones inconsistentes. Un solo individuo podría simular la posición antigua de un sacerdote presente durante el ritual, que suponemos estaba al centro del cuarto o cerca de la puerta. Todas las grabaciones fueron resguardadas en archivos privados.

Análisis de los resultados específicos

Palenque

Palenque, la variante regional occidental de la civilización maya clásica, fue el centro ceremonial principal en el periodo 600-800 a.C., aunque la ocupación más temprana del sitio se remonta a 100 a.C. Se convirtió en un importante centro de población alrededor del año 600 d.C. Las construcciones en el sitio cesaron alrededor del año 800 d.C., por lo que es considerado uno de los principales centros ceremoniales del primer imperio maya (Stuart y Stuart, 2008). En este sitio únicamente realizamos pruebas de sonido en 1999, ya que entonces tenía lugar una reconstrucción.

Se inició la investigación en el Palacio, un conjunto de varios edificios interconectados donde uno de ellos tiene una torre cuadrada de cuatro pisos —única para el periodo Clásico maya que puede ser alineado al solsticio de invierno—. Éste es el complejo más grande de toda la zona: mide 97 m de largo por 73 m de ancho. En el corredor del Palacio se encuentra el Arco Corbel; a uno de sus costados se levanta un muro y al otro lado un claro soportado por numerosos pilares. Se encontró que el resultado de los registros del ruido rosa fue de 259 Hz (C4 o do4), que no fue diferente al obtenido en otras cámaras interiores. En el primer

barrido de 20 Hz-20 kHz se obtuvo un registro de 302 Hz (D4 o re4) que es único; en el segundo barrido de 20 Hz-2 kHz se registró 172 Hz (F3 o fa3) y en el tercer barrido de 20-200 Hz se registró 65 Hz (C2 o do2). En la primera expedición no se realizaron pruebas con excitación de ruido blanco.¹

La Casa A del Palacio tiene varias figuras en forma de cerradura cuyo propósito aún es desconocido, aunque ahora están expuestas al exterior. Se trata de una estructura única de tres lados y uno de ellos completamente abierto al exterior. El ruido rosa se empleó en la cámara interior del Templo de las Inscripciones. El barrido 1, de 20 Hz-20 kHz, fue de 259 Hz (C4 o do4), el barrido 2 de 20-2 kHz, fue de 172 Hz (F3 o fa3) y el barrido 3, de 20-200 Hz, fue de 86 Hz (F2 o fa2); estos resultados fueron consistentes con la mayoría de los sitios mayas analizados. La estructura en forma de cerradura de la izquierda mostró las mismas cifras para los barridos; sin embargo, el ruido rosa mostró una frecuencia inferior de 151 Hz (D#3 o re#3). La diferencia aquí no se ha podido explicar todavía. De la misma manera, el ruido blanco no fue grabado durante esta primera expedición, por lo cual deberá incorporarse en futuras investigaciones.

Luego se trabajó en la pirámide del Templo de las Inscripciones, que mide 27.2 m de alto. Tiene forma de pirámide escalonada, ocho terrazas y varios escalones entre la base del templo y la cámara alta. La cámara superior tiene cinco puertas abiertas, separadas por cuarto pilares. Esta cámara mide 25.5 m de largo por 10.5 m de ancho y 11.5 m de alto. En este sitio, tanto el ruido rosa como el barrido 1, de 20 Hz-20 kHz, mostraron una frecuencia de 259 Hz (C4 o do4): el barrido 2, de 20 Hz-2 kHz, registró una frecuencia de 129 (C3 o do3), y el barrido 3, de 20 Hz-200 Hz, arrojó una frecuencia de 65 Hz (C2 o do2). Estas pruebas se realizaron al aire libre y se observó que la nota C o do prevaleció, en diferentes octavas. “C”

¹ El sistema de notación musical latino es el sistema utilizado para nombrar las notas musicales mediante las sílabas: do, re, mi, fa, sol, la y si. El sistema de notación musical inglés es un tipo de notación musical que usa las letras del alfabeto: C, D, E, F, G, A y B. Su correspondencia es: do (C), re (D), mi (E), fa (F), sol (G), la (A) y si (B).

o “do” es la tercera nota del acorde I de F o fa mayor.

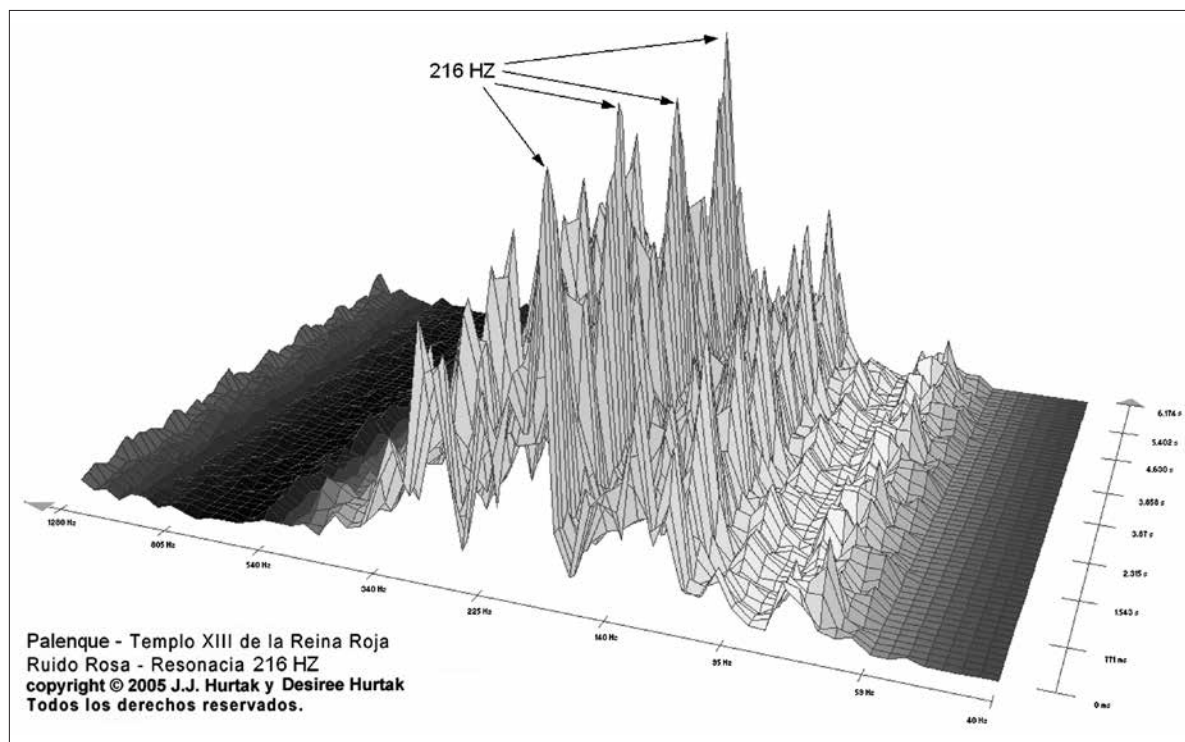
Dentro del templo se encuentra la tumba de Pakal, compuesta por una cámara interior que tiene un sarcófago de casi 3 m de largo y 2 m de ancho. Tiene una escalera estrecha que mide 24 m de largo y conecta el área de la tumba con la cámara superior. La cámara interior mide cerca de 9 m de largo por 4 m de ancho, con un gran arco abovedado de 6.5 m de alto. Los micrófonos se colocaron en la parte superior y al centro del sarcófago, a una distancia de 50 cm de la losa.

El análisis de esta cámara que contiene el sarcófago mostró una resonancia de ruido rosa de 237 Hz (A#3 o la#3), el barrido 1, de 20 Hz-20 kHz, fue de 259 Hz (C4 or do4), el barrido 2, de 20 Hz-2 kHz, fue de 172 Hz (F3 o fa3) y el barrido 3, de 20-200 Hz, fue de 86 Hz (F2 o fa2). La primera y la tercera nota del acorde I de F o fa mayor estaban presentes, así como A# o la#, que es la segunda nota del acorde I de F# o fa# mayor.

Templo XIII o Templo de la Reina Roja

Esta cámara abovedada mide 3.8 m de largo por 2.5 m de ancho. La sala está ocupada casi en su totalidad por un sarcófago de piedra caliza rectangular ubicado al centro de la habitación, que mide 2.4 m de largo por 1.18 m de ancho, que son medidas cercanas a las del sarcófago en Egipto. Esta cámara está tallada en una sola pieza de piedra. El sarcófago está pintado de rojo con cinabrio.

Dentro de la cámara se observó que el ruido rosa fue de 216 Hz (A3 o la3) (fig. 3); el barrido 2, de 20 Hz-2 kHz, fue de 129 Hz (C3 o do3); y el barrido 3, de 20-200 Hz, fue de 65 Hz (C2 o do2); A/la y C/do son la segunda y la tercera nota del acorde I de F o fa mayor. El barrido 1, de 20 Hz-20 kHz mostró una frecuencia de 302 Hz (D4 o re4), y esta misma nota, D4 o re4, fue el tercer armónico que resonó en el vestíbulo de Palenque y en la cámara 2 de Codz Poop, mientras una octava inferior (D3 o re3) resonó en Akab Dzib.



© Fig. 3 Registros en Palenque.

Oxkintok

Oxkintok es una zona cercana a Uxmal, cuyo nombre significa “tres soles cortados” o “tres soles que arden” (Sharer, 2006). Es, quizá, uno de los lugares más antiguos en los que se practicaron las pruebas y se encuentra en la región norte de Yucatán. Hay varias pirámides en el sitio y los arqueólogos señalan que fue habitado alrededor de 300 a.C. Sin embargo, se considera que las estructuras arquitectónicas pertenecen al periodo Clásico, entre 474 y 859 d.C. El sitio tiene una serie de monumentos tallados con inscripciones jeroglíficas, y en ellos pueden verse evidencias muy antiguas sobre las fechas talladas en las estelas.

La zona central de la ciudad se compone de tres complejos de construcción (Cantil, Tzat Tun Tzat y grupo maya), los cuales están conectados por sacbés. El Tzat Tun Tzat, “lugar para perderse” o Satunsat, palabra maya que se traduce como “perdedero” o lugar donde es fácil extraviarse, es la estructura más relevante: un laberinto de tres niveles y una sola entrada (Andrews, 1995). Una leyenda dice que hay un túnel subterráneo que conecta la pirámide principal con la estructura del laberinto, el cual tiene varios salones interconectados por pequeñas puertas y pasadizos estrechos.

Aunque buena parte de la reconstrucción ha sido atribuida a los arqueólogos españoles, se limitó la investigación a la estructura del Tzat Tun Tzat y fueron seleccionadas varias ubicaciones dentro del extenso laberinto. Hay tres niveles sobrepuestos y la fachada del lado occidental, construida por bloques cuadrados de piedra caliza y mortero, tiene 16 cuartos subterráneos distribuidos en los primeros dos niveles, además de una escalera en forma de torre —hoy inaccesible—, usada para llegar al tercer piso.

En el curso de las dos expediciones se hicieron pruebas en la cámara ubicada en el segundo nivel por encima de la entrada frontal, próxima al pasillo. La cámara mide 8.5 m de largo por 1.6 m de ancho. Los resultados de las frecuencias de resonancia de la expedición 1 para el ruido rosa, el barrido 1 y el barrido 3 fueron de 194 Hz (G3 o sol 3), y para el barrido 2 fue de 237 Hz (A#3 o la#3). Los resultados de la expedición 2 para el ruido blanco fueron de 216 Hz (A3 o la3), para

el ruido rosa, de 94 Hz (F#2 o fa#2); para el barrido 1, de 280 Hz (C#4 o do#4); para el barrido 2, de 86 Hz (F2 o fa2), y para el barrido 3, de 43 Hz (F1 o fa1).²

Durante la expedición 1 también se probó una segunda área localizada en la base de la escalera, en el piso subterráneo de la galería al oriente, que mide 9.5 m de largo por 1.6 m de ancho; ésta era parte del vestíbulo que rodeaba la entrada al occidente. El resultado para el ruido rosa, barrido 1 y barrido 2, fue de 216 Hz (A3 o la3) y para el barrido 3 fue de 86 Hz (F2 o fa2).

Uxmal

Uxmal significa “tres veces construida”, y aun cuando algunas leyendas cuentan que un pequeño brujo construyó la pirámide durante la noche, es evidente que hubo cinco construcciones y reconstrucciones durante el periodo del imperio maya (Worley, 2013). La mayor parte del complejo Uxmal es un ejemplo de la arquitectura de la ruta Puuc.

Pirámide del Adivino

La pirámide tiene un poco más de 35 m de altura en cada lado; en lugar de una base cuadrada tiene una base elíptica, y presenta edificaciones. Partes de la primera construcción de la pirámide (Templo I) pueden verse al ascender la escalinata occidental; a la segunda y tercera construcciones (Templo II y III) se accede por la escalera oriental. La cuarta construcción de la pirámide (Templo IV) es claramente visible desde el lado oeste. En la parte superior de la escalera situada al oriente se accede a la quinta construcción (Templo V). Las cámaras interiores, una a cada lado, están a casi 30 m del suelo. En ambas expediciones se realizaron algunas pruebas en la sala del lado oriental de la pirámide.

² Durante todas las pruebas, los canales de sonido derecho e izquierdo se analizaron por separado. Los resultados del canal de sonido derecho no se incluyeron en el contenido del documento, pero se tomaron en cuenta para los resultados de la tabla 1.

La cámara de piedra instalada en la fachada oriental del Templo II, en la Pirámide del Adivino, es muy pequeña, mide 3.5 m de largo por 1.5 m de ancho, y entre 1.5 y 1.7 m de alto. Ese sitio sirvió como prueba para medir los parámetros de construcción y reconstrucción. El ruido rosa utilizado durante la expedición 1 arrojó una frecuencia de resonancia de 194 Hz (G3 o sol3). Durante la expedición 2 se modificaron algunas de las piedras originales que estaban situadas afuera de los muros y fueron repuestas a sus posiciones originales; con esa modificación, tanto el ruido rosa como el ruido blanco revelaron una nueva frecuencia de resonancia de 108 Hz (A2 o la2), exactamente la mitad de 216 Hz (A3 o la3) obtenida en otros sitios. El barrido de las pruebas durante la expedición 2 indicó 345 Hz (F4 o fa4), 259 Hz (C4 o do4) y el muro original 65 Hz (C2 o do2), para el barrido 1, el barrido 2 y el barrido 3, respectivamente. Por tanto, las tres notas del acorde I de F o Fa mayor estuvieron presentes en el espacio restaurado.

Cuadrángulo de las Monjas

El patio es una explanada de pasto rodeada por edificios ornamentados que contienen “arcos”. Cada edificio tiene una altura diferente. La fachada norte, considerada la más antigua, es la más alta. Este patio exclusivo, con escaleras en tres lados, cubre alrededor de 120 m de norte a sur y está formado por cuatro edificios de diferente altura que contienen 74 habitaciones pequeñas, quizá utilizadas como oficinas administrativas o residencias (Kowalski, 1990 y 1994).

En la expedición 2 se utilizó el punto central exterior del cuadrángulo. Este sitio, junto con Chichén Itzá, fueron las únicas dos estructuras al aire libre en que se realizaron pruebas. Se podría suponer que las estructuras al aire libre no son significativas, pero se comprobó que esto es incorrecto, porque las frecuencias de sonido obtenidas en el exterior fueron consistentes con el sonido que se obtuvo en las cámaras interiores. Las pruebas realizadas en el exterior del patio del cuadrángulo, que mide 79 m de largo por 65 m de ancho, revelan también las tres notas del acorde I de F# o fa#

mayor. El ruido rosa y el ruido blanco indicaron una frecuencia de 117 Hz (A#3 o la#3), los tonos del barrido de 20 Hz-20 kHz fueron de 258 Hz (C4 o do4), los del barrido de 20-2 kHz fueron de 141 Hz (C#3 o do#3) y los del barrido de 20-200 Hz fueron de 47 Hz (F#1 o fa#1). Ésta fue la primera confirmación de una zona exterior mostrando las mismas frecuencias de resonancia que las encontradas en las habitaciones interiores, lo cual confirma la importancia de las grandes reuniones en los espacios exteriores. El patrón observado fue uniforme.

El edificio del lado norte es el más antiguo y el más grande. En ambas expediciones se analizaron cuartos similares en el nivel superior del edificio del lado norte del Cuadrángulo de las Monjas. El tamaño de los cuartos era el mismo, y si bien se trataba de cuatro espacios separados, cada uno medía cerca de 5.25 m de largo y 2.3 m de ancho. Las mediciones realizadas en la expedición 2, en específico la de la cámara occidental sobre la pared sur, mostraron una resonancia de ruido blanco de 216 Hz (A3 o la3), una resonancia de ruido rosa de 141 (C#3 o do#3), el barrido 1, de 20 Hz-20 kHz de 164 Hz (E3 o mi3), el barrido 2, de 20 Hz-2 kHz de 141 Hz (C#3 o do#3) y el barrido 3, de 20-200 Hz, de 47 Hz (F#1 o fa#1). Se utilizó el ruido rosa en la expedición 1 y 258 Hz (C4 o do4), el barrido de 20 Hz-20 kHz indicó 259 Hz (C4 o do4), el barrido de 20-2 kHz indicó 172 Hz (F3 o fa3) y el barrido de 20-2000 Hz indicó 86 Hz (F2 o fa2). Estas mediciones muestran la primera y la tercera nota del acorde I tanto de F (fa) mayor como de F# (fa#) mayor. La frecuencia de resonancia de 164 Hz (E3 o mi3) no fue obtenida en otras pruebas dentro de los complejos mayas.

El Palacio del Gobernador

Éste es otro ejemplo perfecto de la arquitectura Puuc, se alza sobre una colina y se piensa que es una de las construcciones más recientes del sitio (987 d.C.) (Kowalski, 1990). Mide cerca de 100 m de largo, 12 de ancho y 9 de altura. Tiene once entradas al lado este y se eligió la sexta entrada al sur para hacer las pruebas. En todas ellas había

24 cámaras. La estructura del Palacio consta de un edificio central con dos alas laterales; tiene un sótano al que no se permite el acceso y en las habitaciones hay arcos falsos (arcos en ménsula). Las pruebas se realizaron en la cámara central del Palacio y se obtuvo una resonancia de ruido rosa de 194 Hz (G3 o sol3); los barridos 1 y 2 fueron de 172 Hz (F3 o fa3) y el barrido 3, de 20-200 Hz, fue de 86 Hz (F2 o fa2). Estos resultados muestran un predominio de la raíz del acorde I de F o fa mayor.

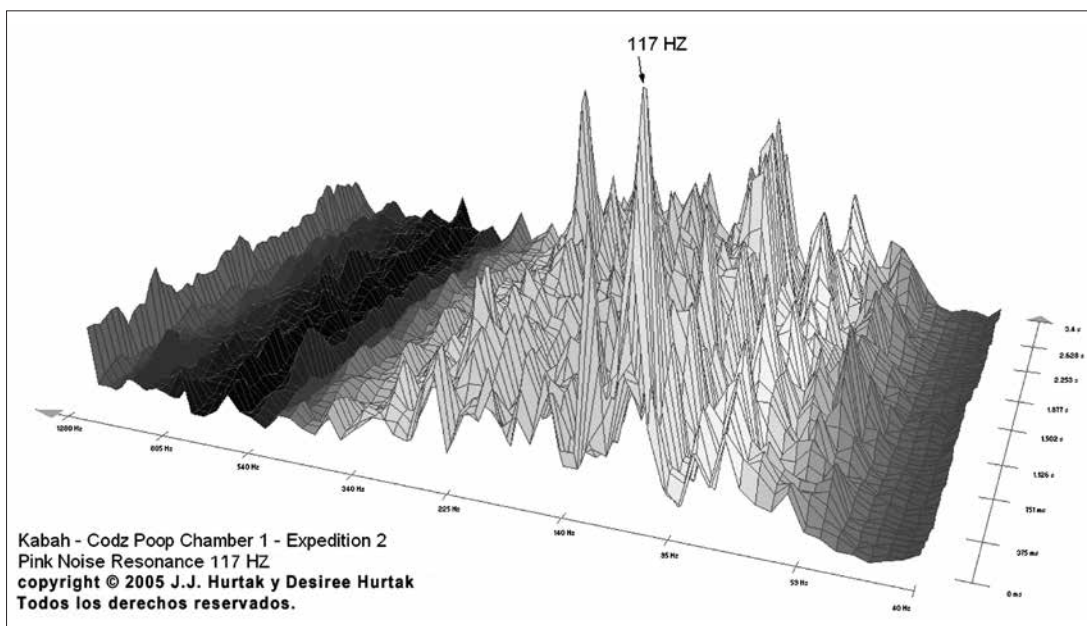
Kabah

Se encuentra 22 km al sur de Uxmal, en las colinas de la ruta Puuc. El nombre tiene varios significados, uno de ellos es “el de la mano fuerte”. Es un sitio pequeño, los edificios individuales son edificios mayas clásicos (850-900 d.C.). Lo más impresionante del sitio es el complejo principal del Palacio y el llamado Codz-Poop (petate enrollado) también conocido como Palacio de las Máscaras o estructura 2C6. La fachada oeste del edificio Codz-Poop mide 46 m de largo y está cubierta por cerca de 260 máscaras de Chac, dios de la lluvia.

La estructura del Codz-Poop tiene cuatro cámaras dobles en el lado occidental, tres de las cuales permanecen completas. Quedan tres cuartos cerrados en el palacio, aunque tal vez había cinco en el diseño original. Se eligió de manera sistemática la tercera sala de la izquierda de la estructura original, que hoy es la cámara central.

En la expedición 1 la recámara emitió una frecuencia de 216 Hz (A3 o la3) al usar el ruido rosa; el barrido 1, de 20 Hz-20 kHz, fue de 259 Hz (C4 o do4); el barrido 2, de 20 Hz-2 kHz, fue de 216 Hz (A3 o la3), y el barrido 3, de 20-200 Hz, fue de 86 Hz (F2 o fa2). Por tanto, en la sala 1 para la expedición 1 se obtuvieron las tres notas del acorde I de fa mayor. Durante la misma expedición se hicieron pruebas en la cámara interior y se realizaron registros con excitación de ruido rosa a una frecuencia de 259 Hz (C4 o do4); el barrido 1, de 20 Hz-20 kHz, fue de 302 Hz (D4 o re4), el barrido 2, de 20 Hz-2 kHz, fue de 172 Hz (F3 o fa3) y el barrido 3, de 20-200 Hz, fue de 86 Hz (F2 o fa2).

En la expedición 2 se realizaron pruebas en la misma cámara, cerca de la puerta, lo cual dio resultados diferentes, si bien predominaron las mismas notas: A/A# (la/la#) y F/F# (fa/fa#). El ruido blanco fue de 258 Hz (C4 o do4) y el ruido rosa



© Fig. 4 Registros en Kabah.

fue de 117 Hz (A#2 o la#2) (fig. 4); el barrido 1, de 20 Hz-20 kHz, fue de 352 Hz (F4 o fa4); el barrido 2, de 20 Hz-2 kHz, fue también de 117 Hz (A#2 o la#2), y el barrido 3, de 20-200 Hz, fue de 47 Hz (F#1 o fa#1). Se hizo una segunda prueba en la cámara cerrada al lado derecho, y se utilizó el cuarto interior en lugar del cuarto exterior.

Chichén Itzá

Chichén Itzá, cuyo nombre significa “en la boca del pozo de Itzá”, tiene El Castillo —conocido también como Pirámide de Kukulcán—, con una base de 55 m² y una altura de 30 m. Los arqueólogos han determinado que Chichén Itzá fue ocupado dos veces: primero en 495-692 d.C. y luego en 948-1204 d.C. (Jones, 1995). Se cree que la fachada exterior de la pirámide está conectada con la última ocupación maya-tolteca (Foster, 2002).

El complejo de Chichén Itzá cubre 15 km². Uno de los efectos de sonido más conocidos tiene lugar en el área abierta al norte de la Pirámide de Kukulcán, la cual cuenta con cuatro escaleras de 91 escalones y una plataforma superior, que constituye un escalón más, para un total de 365 escalones. Esta zona, como Tikal, es conocida por producir interesantes efectos de sonido. Los turistas, por ejemplo, a menudo aplauden frente a la pirámide y escuchan los sonidos que imitan al quetzal (Lubman, 2002). Se cree que esto podría estar conectado con Kukulcán, el nombre en maya para Quetzalcóatl (serpiente emplumada).

El Castillo, la pirámide principal de Chichén Itzá, fue uno de los sitios clave para realizar nuestras pruebas de sonido. De acuerdo con Ball (2004), las dimensiones de los escalones de la pirámide de Kukulcán sugieren que los constructores trataron de producir una “imitación acústica”. Se cree que los cambios en el sonido se producen por la variación en la longitud y en la altura del escalón, así como en la del ángulo y la pendiente.

Pirámide de Kukulcán

En la expedición 1 se realizó una prueba al colocar el equipo en la parte central de la Plataforma

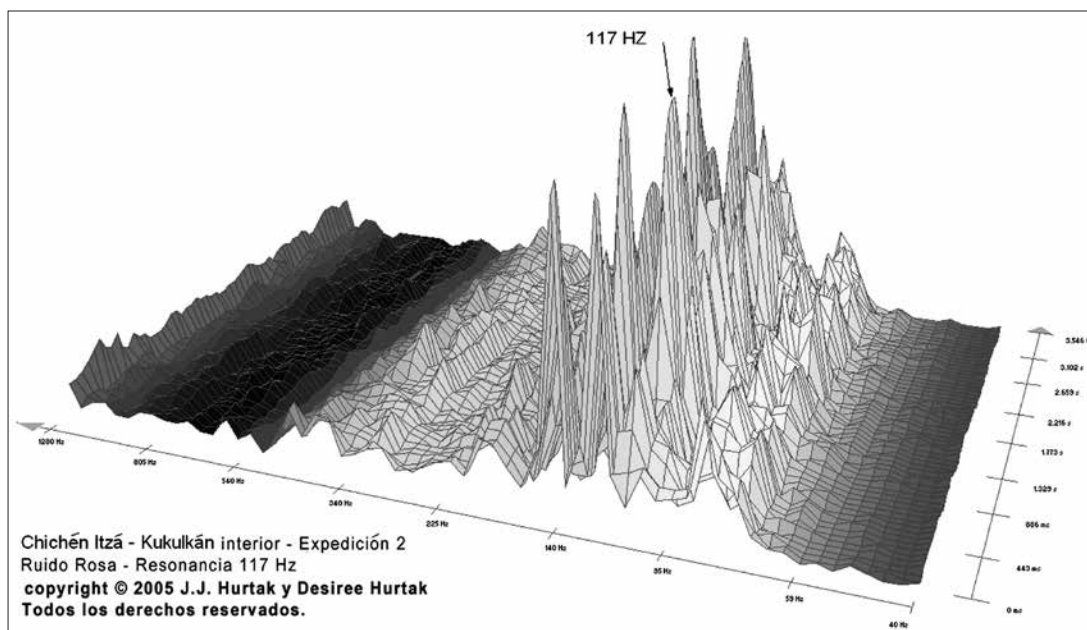
de Venus, el Templo del Jaguar y la Pirámide de Kukulcán, en vez de sólo estar frente a la pirámide. Al aplicar el ruido rosa, el barrido 1 y el barrido 2 se obtuvieron 216 Hz (A3 o la3) y al aplicar el barrido 3 se obtuvieron 86 Hz (F2 o fa2).

Al ascender 24 m se llega a una parte plana en la zona superior de la pirámide, donde hay varias cámaras —cada una de ellas mide 14 m de largo—, muy probablemente con fines ceremoniales. Tiene pórticos abiertos a los cuatro lados y una estructura sólida al aire libre. La puerta principal al norte consta de un pórtico con tres puertas abiertas.

La prueba realizada en esta zona en 1999 indicó una frecuencia de resonancia de ruido rosa de 194 Hz (G3 o sol3), mientras el barrido 1, de 20 Hz-20 kHz, fue de 108 Hz (A2 o la2), de nuevo, la mitad de 216 Hz registrados en la cámara interior de este Templo Superior. El barrido 2, de 20 Hz-2 kHz, fue de 194 Hz (G3 o sol3) y el barrido 3, de 20-200 Hz, fue de 86 Hz (F2 o fa2).

La pirámide tiene cuatro escaleras centradas, correspondientes a cada punto cardinal. Además de los sonidos de “aves” que se escuchan del lado norte, la balastrada de la escalera principal de la pirámide occidental es famosa por la aparición de la “serpiente” durante los equinoccios, justamente cuando el sol proyecta una sombra a las 15 horas y aparecen siete triángulos formando un cuerpo semejante al de una serpiente al descender por la escalera hasta llegar a la cabeza de piedra en la base.

Lo más importante para la investigación es que la pirámide tiene una cámara cerrada, la cual tal vez fue construida en un periodo anterior, durante el periodo Clásico maya (Jones, 1995). Se llega a la cámara por medio de una escalera cercana a la base de la escalera norte. La escalera interior conduce a dos habitaciones contiguas, una contiene la escultura de Chac Mool y la otra muestra el llamado “trono del jaguar”, compuesto de jade y turquesa. En esa cámara se realizaron pruebas de sonido. En la expedición 1 se encontró la frecuencia de resonancia de 216 Hz (A3 o la3), tanto del ruido rosa como del barrido 1, de 20 Hz-20 kHz; el barrido 2, de 20 Hz-2 kHz, mostró una frecuencia de 194 Hz (G3 o sol3) y el barrido 3, de 20-200 Hz, registró 86 Hz (F2 o fa2).



© Fig. 5 Registros en Chichen Itzá, 1.

En la expedición 2 (figs. 5 y 6), se encontró la frecuencia de resonancia de 117 Hz (A#2 o la#2), tanto al aplicar la señal del ruido rosa como la del barrido 2; el barrido 1, de 20 Hz-20 kHz, resonó en 469 Hz (A# o la#4) y el ángulo izquierdo de barrido 3, de 20-200 Hz, resonó en 47 Hz (F#1 o fa#1). Aunque la frecuencia de 469 Hz (A#4 o la#4) parece única, no lo es, puesto que está sólo dos octavas arriba de la frecuencia de 117 Hz (A#2 o la#2), frecuencia consistente con los resultados obtenidos en la cámara interior.

Casa Colorada o “Casa Roja”

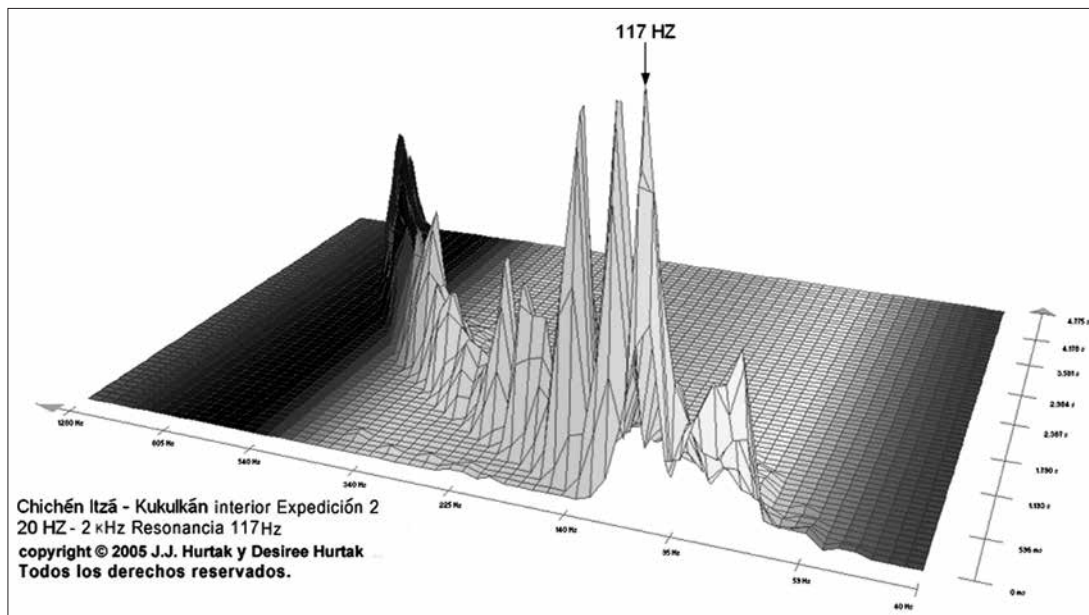
Este sitio también es considerado parte de la época Clásica maya en el estilo Puuc, sin mostrar influencia tolteca alguna. Está construida sobre una base con las esquinas redondeadas, tiene tres habitaciones, con inscripciones jeroglíficas en las puertas, y para añadir altura al edificio se fijaron adornos en la parte superior de las paredes. Tiene tres habitaciones en el interior que miden de 3 a 4 m de largo por 2.5 m de ancho, más una cuarta habitación que mide 11.5 m de largo por 2.25 m de ancho. Tiene también tres puertas abiertas,

tanto en el interior como en el exterior. Las pruebas se practicaron en el centro del cuarto exterior.

La prueba de ruido rosa indicó una resonancia de 280 Hz (C#4 o do#4); la medición del barrido 1, de 20 Hz-20 kHz, fue de 259 Hz (C4 o do4); y la del barrido 3, de 20-200 Hz, fue de 172 Hz (F3 o fa3).

Akab Dzib

Se cree que Akab Dzib es uno de los edificios sagrados del sitio y que los jeroglíficos son tan puros que sólo quienes pertenecen al sacerdocio pueden leerlos (Desmond, 1989). El edificio mide 15 m de largo por 50 m de ancho y 6 m de alto, tiene techo y carece de ventanas. Para realizar las pruebas se eligió un cuarto ubicado en el lado sur del edificio y que mide 5.5 m de largo por 2.5 m de ancho, con una puerta al exterior que tiene un cuarto en el interior, justo detrás del primer cuarto, y tiene las mismas medidas. Akab Dzib puede traducirse como “la escritura que se lee en la noche”; el edificio fue construido en un estilo maya Clásico y es el único formado por un centro sóli-



© Fig. 6 Registros en Chichen Itzá, 2.

do, con una sala localizada al norte, otra al sur y otra al oeste.

Akad Dzib mostró una resonancia de ruido rosa de 237 Hz (A#3 o la#3), que es la segunda nota del acorde I de fa# mayor. Los barridos en Akad Dzib mostraron las siguientes frecuencias de resonancia: el barrido 1, de 20 Hz-20 kHz, dio una frecuencia de 151 Hz (D#3 o re#3); el barrido 2, de 20 Hz-2 kHz, fue de 172 Hz (F3 o fa3), la primera nota de acorde I de F o Fa mayor; el barrido 3, de 20-200 Hz, fue de 65 Hz o (C2 o do2), que es la tercera nota del acorde I de Fa mayor. Se observó que el barrido 1 dio una frecuencia de resonancia de 151 Hz (D#3 o re#3), un ritmo acelerado que dio como resultado datos armónicos impares; sin embargo, aún se relaciona armónicamente con todas las resonancias que existen, además de haberse manifestado también en otros sitios (por ejemplo, en la zona izquierda de la figura en forma de cerradura en Palenque). Es necesario recordar que la frecuencia de D4 o re4 fue registrada en varios lugares. Aunque este D4 o re4 no forma parte de la tríada de los acordes I de fa mayor y de fa# mayor, parece ser parte de las resonancias armónicas presentes en el sistema

maya. El principal punto de intersección también reveló la resonancia de 216 Hz (A3 or la3).

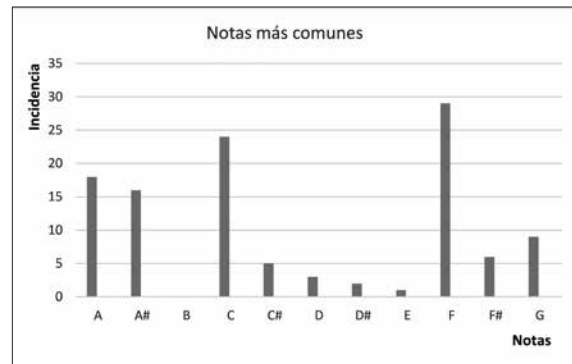
Conclusiones generales

Aunque las proporciones arquitectónicas son interesantes, se puede deducir que los materiales de construcción son una característica muy importante en las frecuencias de resonancia.

En la figura 7 puede verse la correspondencia entre las frecuencias de resonancia obtenidas en los lugares en que se realizaron las pruebas de sonido y las notas musicales correspondientes a cada frecuencia, tomando en cuenta la afinación estándar de A o la 440 Hz de la teoría de la tonalidad. También se muestra que las frecuencias de mayor incidencia fueron de 86 Hz (F2 o fa2), las de incidencia media fueron de 216 Hz (A3 o la3) y las de menor incidencia fueron de 172 Hz (F3 o fa3) y de 259 Hz (C4 o do4). También es claro que las notas equivalentes a esas frecuencias son F/fa, A/la y C/do, correspondientes a la primera, la segunda y la tercera nota del acorde I de F/fa mayor; es decir, existe una consistencia en varios de los



● Fig. 7 Correspondencia entre frecuencias y notas.



● Fig. 8 Notas obtenidas más comunes.

resultados obtenidos y que se relacionan con la tríada de F/fa mayor.

En la figura 8 puede verse que no hay frecuencias relacionadas con la nota B o si; al haber sólo una frecuencia relacionada con la nota E o mi, y cuatro frecuencias relacionadas con las notas C o do y D o re. Se observa que las notas predominantes fueron las correspondientes al acorde I de F/fa mayor; es decir, F/fa, A/la y C/do.

Las frecuencias de resonancia obtenidas están más relacionadas con las notas del acorde I de F o fa mayor, que con las notas del acorde I de F# o fa# mayor, lo cual confirma la consistencia de la tríada de F/fa mayor en los resultados obtenidos.

Las pruebas musicales y acústicas efectuadas en algunas cámaras de las edificaciones de Yucatán y Chiapas muestran —de acuerdo con las mediciones efectuadas— que existe una métrica acústica conservada en su estructura. La frecuencia musical natural prevaleciente en los lugares estudiados es la del acorde I de fa (F) mayor, que incluye a las notas fa (F), la (A) y do (C). Ésta es la gama de vibración encontrada en los centros ceremoniales mayas, la cual está relacionada con el diseño de su patrón arquitectónico.

Glosario

hertz (Hz). Frecuencia del sonido que representa un ciclo por cada segundo.

onda de barrido. Forma de onda senoidal de 20 a 20 kHz, que cubre la frecuencia más baja a la fre-

cuencia más alta y que la mayoría de los humanos pueden oír.

ondas estacionarias. Frecuencia natural de oscilación libre.

paisaje sonoro. Entorno de sonidos de un lugar determinado.

resonancia A. Fenómeno que muestra un sistema físico afectado por una fuerza motriz externa periódica, donde la amplitud resultante de la oscilación del sistema se hace más grande cuando la frecuencia se acerca a una frecuencia natural de oscilación libre del sistema. Hoy en día todos los instrumentos están afinados al estándar de A4 o la4 = 440 Hz. Aunque ésta sugirió en Estados Unidos desde 1936 —auspiciada por la American Standards Association—, sólo hasta 1955 la International Organization for Standardization la estableció como estándar, y a lo largo de 20 años se adoptó a nivel mundial. En Europa, el estándar de 435 Hz se estableció en 1885. Los investigadores de hoy en día, y nosotros como parte de esta investigación, queremos determinar la frecuencia utilizada por las culturas antiguas alrededor del mundo. Sin embargo, nosotros usamos la de la4 = 440 Hz como afinación estándar reconocida.

resonancia natural. Patrón acústico de ondas de sonido generadas por una fuerza periódica externa. La amplitud resultante de la oscilación del sistema se hace más grande cuando la frecuencia externa se acerca a la frecuencia natural del sistema.

ruido blanco. Señal aleatoria que se caracteriza por el hecho de que sus valores de señal en dos tiempos diferentes no guardan correlación estadística. Como consecuencia de ello, su densidad espectral de potencia es una constante, es decir, su gráfica es

plana. Esto significa que la señal contiene todas las frecuencias y todas ellas muestran la misma potencia.

ruido rosa. Ruido cuyo nivel sonoro está caracterizado por un descenso de tres decibeles por octava. Cuando el ruido rosa se visualiza en un analizador con filtros de octava, el ruido se ve como si todas las bandas de octava tuviesen el mismo nivel sonoro, lo cual es cierto; sin embargo, el ruido rosa no tiene el mismo nivel en todas las frecuencias. Esto ocurre porque los filtros de octava, tercio, etcétera, son filtros proporcionales y, por tanto, cada vez que subimos una octava doblamos el ancho de banda y por eso el ruido rosa decrece 3 dB por octava, justo la proporción en que aumenta el ancho de banda, el doble. De esta forma visualizamos el ruido rosa como un ruido de nivel constante en todas las bandas de octava. Se utiliza para analizar el comportamiento de las salas, altavoces, equipos de sonido etcétera. Es una señal conocida, mismo nivel en todas las bandas (sonido “plano”).

intonía inductiva. Procesamiento de las composiciones musicales a través de señales premusicales.

vibración simpática. Se refiere a una propiedad de sonido de densidad infinita, una vibración producida en un solo cuerpo por las vibraciones de exactamente el mismo periodo en un cuerpo de vecinos.

Bibliografía

- Adel-Rahman, M.
1991. The Potential of Absorption Coefficient and Seismic Quality Factor in Delineating Less Sound Foundation Materials in Jabal Shih Az Sahara Area, Northwest of Sanaa, Yemen. *Earth Sciences*, 5: 181-187.
- Amézquita, R. A.
2015. *Metodología de análisis acústico de sitios arqueológicos de Mesoamérica*. Tesis de doctorado. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Andrews, G. F.
1995. Puuc Architectural Styles: A Reassessment. En George Andrews, *Pyramids and Palaces, Monsters and Masks: The Golden Age of Maya Architecture* (vol. 1, pp. 3-132). Lancaster, Labyrinthos.
- Ball, P.
2004. Mystery of “Chirping” Pyramid Decoded. Acoustic Analysis Shows how Temple Transforms Echoes into Sounds of Nature. *Nature*, 14 de diciembre. doi: 10.1038/news041213-5
- Barrera Rubio, A., y Moll, R. G.
2011. *El sureste mexicano. Yucatán: mayas*. México, INAH / Azabache (Ciudades prehispánicas, 3).
- Both, A. A.
2008. La música prehispánica. Sonidos rituales a lo largo de la historia. *Arqueología Mexicana*, XVI(94): 28-37.
- Bourg, Cameron H.
2005. *Ancient Maya Music Now With Sound*. Tesis de maestría. Louisiana State University, Baton Rouge.
- Buckley, A.
1989. Music Archaeology: Its Contribution to “Cultural” Musicology and Historical Ethnomusicology. *Archaeologia Musicalis*, 3(1): 109-113.
- Carrera, J., y S. Beristáin
2002. Theoretical Interpretation of a Case Study: Acoustic Resonance in an Archaeological Site. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112(5): 2285.
- Coe, Michael D.
1966. *The Maya*. Nueva York, Praeger.
- Desmond, L. G.
1989. Of Facts and Hearsay: Bringing Augustus Le Plongeon into Focus. En A. L. Christenson (ed.), *Tracing Archaeology's Past: The Historiography of Archaeology* (pp. 139-150). Carbondale, Southern Illinois University Press.
- Ferguson, W. M., y Adams, A. R.
2001. *Mesoamerica's Ancient Cities*. Albuquerque, University of New Mexico Press.
- Ferguson, W. N., y Royce, J. Q.
1977. *Maya Ruins of Mexico in Color: Palenque, Uxmal, Kabah, Sayil, Xlapak, Labná, Chichén Itzá, Cobá, Tulum*. Norman, University of Oklahoma Press.

- Flores Dorantes, F., y Vázquez Valle, I.
1997. Los instrumentos musicales prehispánicos de los mayas. En *Música prehispánica en las comunidades y culturas del Estado de México*. Toluca, UAEM (Cuadernos de Cultura Universitaria, 15).
- Foster, Lynn V.
2002. *Handbook to Life in the Ancient Maya World*. Oxford, Oxford University Press.
- Garza, C., Medina, A., Padilla, P., Ramos, A., y Zalaquett, F.
2008. Arqueoacústica maya. La necesidad del estudio sistemático de efectos acústicos en sitios arqueológicos. *Estudios de Cultura Maya*, XXXII: 63-87.
- Gómez G., L. A.
2008. Los instrumentos musicales prehispánicos. Clasificación general y significado. *Arqueología Mexicana*, XVI(94): 38-46.
- Griffiths, D.H y R.D. Barker
1964. Electrical Imaging in Archaeology. *Journal of Archaeological Studies*, 21: 153-158.
- Helmholtz, H.
1912. *On the Sensations of Tone* (4ª ed.), Londres. Longmans and Green.
- Hurtak, J. J.
1977. *Harmonics of Light, Color and Sound*. Los Gatos, Ca., Academy for Future Science.
- Kowalski, J. K.
1990. *Guía de Uxmal y la región Puuc: Kabah, Sayil, y Labná*. Mérida, Dante.

1994. Uxmal como una ciudad real-ritual: el ascenso y descenso de un estado segmentario en la región este de la zona Puuc. En Silvia Trejo (ed.), *Modelos de entidades políticas mayas. Primer Seminario de la Mesa Redonda de Palenque*. México, INAH.

1999. *Mesoamerican Architecture as a Cultural Symbol*. Oxford, Oxford University Press.
- Lawler, A.
2012. Uncovering Civilization's Roots. *Science*, 335(6070): 790-793.
- Lubman, D.
2002. Acoustical Features of Two Mayan Monuments at Chichen Itza: Accident or Design. *Journal of Acoustical Society of America*, 112(5): 2285.
- Meyer, J.
2009. *Acoustics and the Performance of Music: Manual for Acousticians Audio Engineers, Musicians, Architects and Musical Instrument Makers* (5ª ed.). Berlín, Springer.
- Nrunori, N., y Torrisi, S.
1930. Ultra-High-Frequency Electromagnetic Vibrations, their Effects on Living Organisms. *American Journal of Physical Therapy*. Junio: 102-104.
- Pearce, K.
1984. *The View from the Top of the Temple*. Albuquerque, University of New Mexico Press.
- Pérez-Flores, M. A., Méndez-Delgado., S., y Gómez-Treviño, E.
2001. Imaging Flow Frequency and DC Electromagnetic Fields Using a Simple Linear Approximation. *Geophysics*, 66(4): 1067-1081.
- Sharer, R. J.
2006. *The Ancient Maya*. Stanford, Stanford University Press.
- Stuart, D.
1998. The Fire Enters His House: Architecture and Ritual in Classic Maya Texts. En S.D. Houston (ed.), *Function and Meaning in Classic Maya Architecture*. Washington, D.C., Dumbarton Oaks Research Library and Collection.
- Stuart, D., y Stuart, G. E.
2008. *Palenque: Eternal City of the Maya*. Londres, Thames & Hudson.
- Sundberg, J.
1973. The Source Spectrum in Professional Singing. *Folia Phoniatrica*, 25: 71-90.
- Thompson, J. Eric. S.
1966. *The Rise and Fall of Maya Civilization* (2ª ed.). Norman, University of Oklahoma Press.

- Von Hagen, V. W.
1960. *The World of the Maya*. Nueva York, The New American Library.
- Worley, P. M.
2013. *Telling and Being Told: Storytelling and Cultural Control in Contemporary Yucatec Maya Literatures*. Tucson, University of Arizona Press.
- Zhang, J. *et al.*
1999. Oldest Playable Musical Instruments Found at Jiahu Early Neolithic site in China. *Nature*, 401: 366-367.

