

Cámaras ocultas en la

El descubrimiento de un túnel bajo la Pirámide del Sol de Teotihuacan facilita la búsqueda de cavidades ocultas en este monumento arqueológico mediante la detección de rayos cósmicos



Pirámide del Sol

R. Alfaro, E. Belmont Moreno, A. Cervantes, V. Grabski, J. M. López Robles, L. Manzanilla, A. Martínez Dávalos, M. Moreno, A. Sandoval y A. Menchaca Rocha

1. TEOTIHUACAN constituye la ciudad más importante y representativa del período clásico en el altiplano central mexicano. Esta vista desde lo alto de la Pirámide de la Luna muestra, en el centro, el gran eje que define la calzada de los Muertos. A la izquierda se alza la construcción de mayor tamaño: la Pirámide del Sol.



La búsqueda de bóvedas en sitios históricos constituye una de las tareas más interesantes del quehacer arqueológico. Pero cuando se trata de pirámides y otros monumentos de gran tamaño, esta labor se encuentra severamente limitada por la carencia de técnicas prospectivas de gran penetración. En el decenio de los setenta del siglo pasado, Luis Alvarez, entonces en la Universidad de California en Berkeley, demostró que la existencia de túneles en la base de un monumento facilita la obtención de información estructural del mismo mediante la detección de rayos cósmicos.

E. P. George, entonces en el Colegio Birkbeck de la Universidad de Londres, desarrolló en 1955 la técnica de atenuación de muones para medir el espesor de la capa de nieve que en invierno cubría las montañas australianas (instalaba los detectores de muones en verano). Años después, Alvarez y su grupo colocaron un detector de muones en una cámara situada bajo la Pirámide de Kefrén, en Giza. Lograron así eliminar especulaciones surgidas de la similitud con la vecina Pirámide de Keops, sobre la posible existencia de una bóveda superior en ese monumento.

En la ciudad mexicana de Teotihuacan, el hallazgo de un túnel excavado a ocho metros bajo la Pirámide del Sol, y que llega cerca del centro de la base, ofrece una oportunidad extraordinaria para llevar a cabo una medición similar. El objetivo de nuestro trabajo es utilizar los rayos cósmicos para arrojar luz sobre uno

de los mayores enigmas de la cultura teotihuacana: el propósito por el que se construyó la Pirámide del Sol.

La Pirámide del Sol

Teotihuacan constituye la ciudad más importante y representativa del período clásico en el altiplano central mexicano. Esta gran urbe se desarrolló durante los primeros seis siglos de la Era cristiana; su rico legado cultural muestra el crecimiento e influencia que alcanzó en toda Mesoamérica y en el norte de México. En el centro de Teotihuacan destacan dos estructuras monumentales: las Pirámides del Sol y de la Luna. Teotihuacan cuenta también con un complejo ceremonial y administrativo, la Ciudadela, y con lo que se denomina el “Gran Conjunto”. Todo está planeado con base al eje que define la Calzada de los Muertos, donde se alzan otras construcciones y conjuntos residenciales.

La Pirámide del Sol constituye la estructura de mayor tamaño en Teotihuacan. Desde sus 65 metros de altura se domina todo el conjunto arqueológico. Su base cuadrada con lados de 215 metros cubre una superficie total de 46.225 metros cuadrados; ocupa un volumen aproximado de un millón de metros cúbicos. La parte externa de la pirámide se subdivide en cinco cuerpos. La cara principal, accesible desde la Calzada de los Muertos, está orientada a 15° 17' respecto al norte astronómico; cuenta con unas escaleras. También en ese lado encontramos un “cuerpo adosado”, desviado unos grados al

2. EL VALLE DE MEXICO se encuentra en el altiplano central, a casi 40 kilómetros al noreste de la actual ciudad de México. Comprende un área aproximada de 505 km²; su altitud ronda los 2300 metros. La ubicación estratégica de Teotihuacan en este valle resultó decisiva para la influencia de la ciudad en Mesoamérica y en el norte de México. La región contaba con abundantes fuentes de agua, que propiciaron el asentamiento y desarrollo de culturas como la teotihuacana y mexicana.



R. ALFARO, E. BELMONT MORENO, A. CERVANTES, V. GRABSKI, J. M. LOPEZ ROBLES, L. MANZANILLA, A. MARTINEZ DAVALOS, M. MORENO Y A. MENCHACA ROCHA

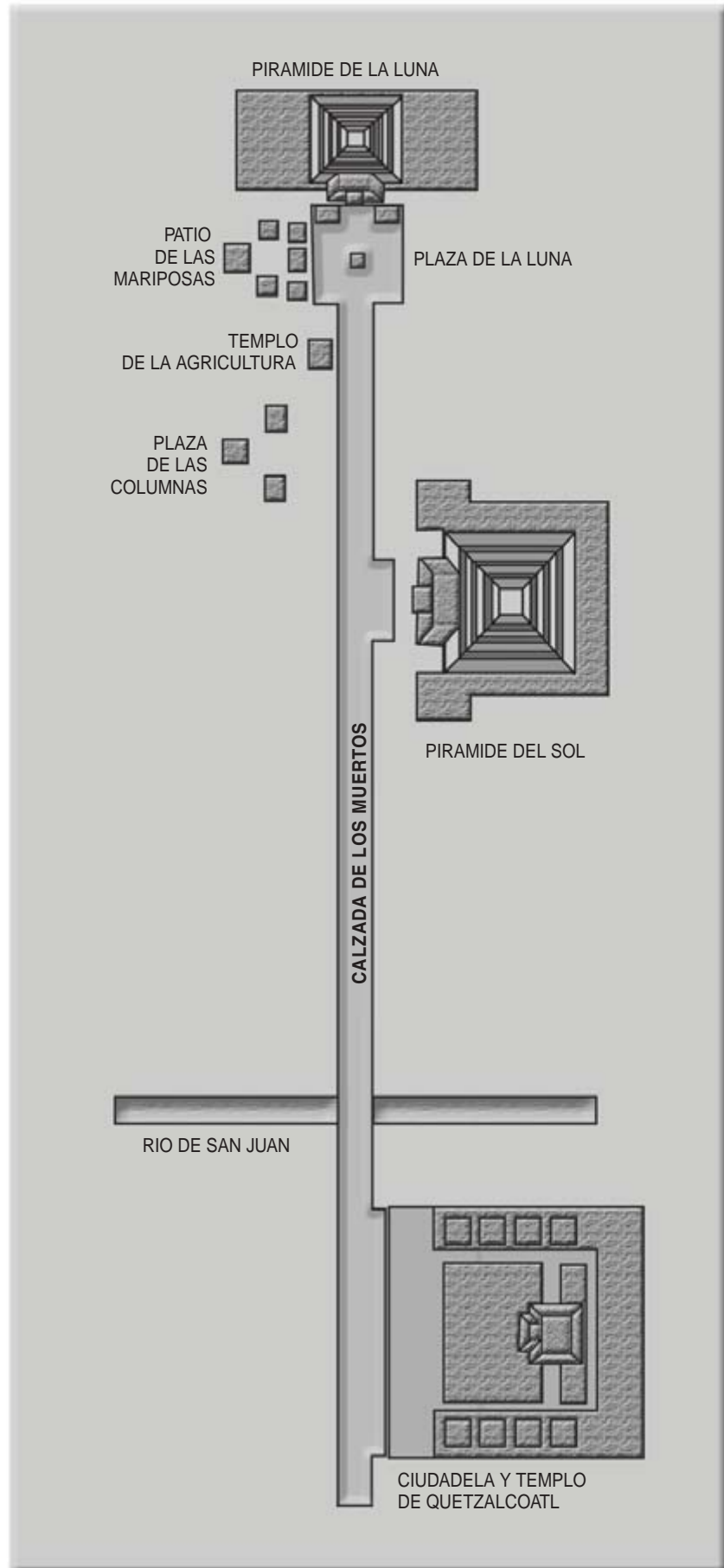
noroeste del eje de la pirámide; indica con mayor exactitud la dirección de la puesta del sol. Su altura es inferior a la del primer cuerpo; tiene un saliente de 17 metros de largo y 38 metros de ancho. Una gran plataforma en U rodea la pirámide por sus lados norte, este y sur. En fecha reciente se descubrieron un canal de tres metros de ancho que rodea la pirámide, así como unos marcadores astronómicos sobre el piso de estuco de la última etapa constructiva de Teotihuacan.

Estudios arqueológicos

Desde la época colonial, los cronistas dedicaron parte de su obra a Teotihuacan; sobre todo a la Pirámide del Sol. Entre ellos destacaron fray Jerónimo de Benavente (Motolinia), fray Jerónimo de Mendieta, fray Bernardino de Sahagún y fray Juan de Torquemada. También el Barón de Humboldt, quien llegó a México en 1803. En 1864, la Comisión Científica de Pachuca realizó, bajo la dirección de Ramón Almaraz, el primer estudio formal de Teotihuacan. El informe correspondiente describe la orientación de las pirámides; respecto a la Pirámide del Sol, señala la existencia de la plataforma que la rodea por tres de sus lados.

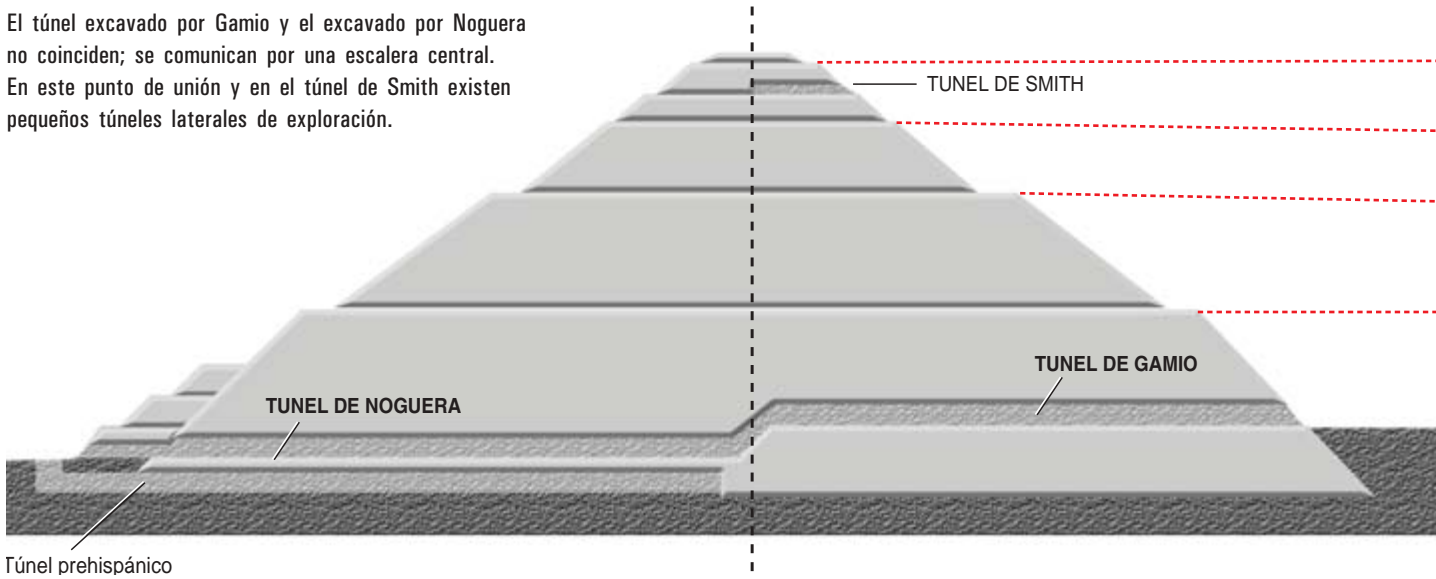
Las exploraciones oficiales en Teotihuacan no comenzaron hasta 1905, cuando Porfirio Díaz designó como Inspector de Monumentos Arqueológicos a Leopoldo Batres. Este realizó los primeros trabajos de restauración en la Pirámide del Sol ese mismo año; removió la tierra que la cubría para revelar la forma original. En 1917, Manuel Gamio fue el primer arqueólogo en llevar a cabo un proyecto multidisciplinario en Teotihuacan; por medio de la estratigrafía artificial, se proponía descifrar la cronología de la Pirámide del Sol. En 1922, el propio Gamio decidió abrir un túnel: desde el lado este de la pirámide hasta el centro. El túnel penetró 97 metros en dirección oeste desde la primera plataforma de la pirámide, que marca la división entre el primer y el segundo cuerpo, cerca del nivel del suelo. En 1933, Eduardo

3. EL CENTRO URBANO DE TEOTIHUACAN con algunas de las construcciones más importantes: la Pirámide del Sol, la de la Luna y la Ciudadela, ubicadas a lo largo de la Calzada de los Muertos, el eje principal de la ciudad.



4. VARIOS TUNELES recorren la Pirámide del Sol.

El túnel excavado por Gamio y el excavado por Noguera no coinciden; se comunican por una escalera central. En este punto de unión y en el túnel de Smith existen pequeños túneles laterales de exploración.



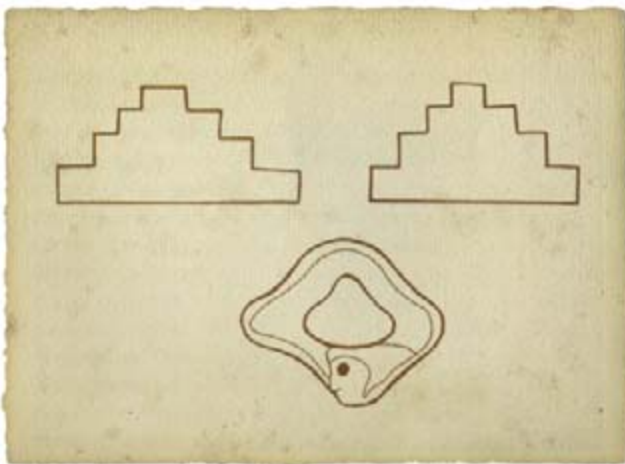
Noguera y José R. Pérez excavaron un segundo túnel de 116,5 metros de longitud que partía de la plataforma adosada, en el lado oeste; en el centro de la pirámide se encontraba con el túnel de Gamio. Ambas excavaciones concluyeron que no existía ninguna estructura interna que indicara una superposición de edificios, como es común encontrar en otras pirámides mesoamericanas. Se obtuvieron datos sobre el sistema de construcción; el material cerámico encontrado se analizó con el propósito de reconocer la posible existencia de dos o más culturas en el sitio.

En 1947, Remy Bastien llevó a cabo una investigación arquitectónica de la Pirámide del Sol. Dos años después excavó un túnel de nueve metros de profundidad con dirección sur-norte en el punto donde se unen los túneles de Gamio y Noguera. Sin embargo, no se conoce el informe

arqueológico de este trabajo. Un decenio después, René Millon, Bruce Drewitt y James A. Bennyhoff reexaminaron los túneles de la pirámide en busca de datos sobre estructuras que pudiesen haber pasado inadvertidas hasta entonces. Millon señaló que no podían contradecirse las conclusiones previas sobre el diseño y la edificación de la pirámide, ni sobre los problemas sociales y técnicos que acompañaron su construcción.

En 1962, Robert Smith excavó otro túnel en dirección este-oeste de 30 metros de longitud; esta vez en la parte superior de la pirámide, en lo que correspondería al quinto cuerpo. Dentro de este túnel, Evelyn Rattray abrió en 1968 un pozo de sondeo con el propósito de encontrar cerámica que facilitara la datación de la pirámide. El arqueólogo Ponciano Salazar realizó excavaciones (1962-1964) en un túnel norte-sur de la plataforma baja en su lado norte. Sin embargo, tampoco se ha hallado ningún informe sobre esa intervención.

De acuerdo con los trabajos de excavación de túneles realizados en la Pirámide del Sol, el sistema constructivo de este monumento sería el siguiente. El interior parece estar compuesto de adobes, arcillas, tepetate y rocas de tamaño reducido, así como de una gran cantidad de tiestos y fragmentos de obsidiana. Se supone que la construcción de la Pirámide del Sol comenzó con la delimitación de la forma general del edificio mediante muros toscamente levantados con piedra y barro, tepetate o adobe; realizaban la función de muro de contención reforzado por contrafuertes. El segundo paso consistió en rellenar los espacios vacíos con piedra suelta y tierra, sin material de unión. Según el arqueólogo Rubén Cabrera, del mexicano Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) quizá se utilizaran cajones de adobes para contener el relleno (como se usó en el Templo de Quetzalcóatl). Por fin, se añadió un recubrimiento de piedra pequeña; encima, una capa de concreto de unos 40 centímetros de espesor. Ignacio Marquina menciona que todos los cuerpos de la pirámide conservan restos de un grueso aplanado, que los debió cubrir en su totalidad; tal vez estaban pintados



5. LOS ORACULOS se alojaban, muy a menudo, en cuevas. Apoyados en ese dato, suponemos que en la cueva de lava debajo de la Pirámide del Sol habría un oráculo. De hecho, el Códice Xólotl muestra el glifo de Teotihuacan representado por dos pirámides sobre un oráculo dentro de una cueva.



de algún color u ornamentados con murales. El terreno donde se asienta la pirámide era de humus; debajo de esa capa de tierra vegetal, otra de tepetate, mucho más firme, aguantaba el peso del monumento.

El túnel subterráneo

En 1971 se localizó, al pie de la Pirámide del Sol, un pozo de siete metros de profundidad lleno de piedras y cascajo. Al remover el material se descubrió una escalera antigua que llevaba hasta un túnel situado justo debajo de la pirámide. Este hallazgo dio comienzo a los trabajos de investigación de Jorge Acosta y Doris Heyden, del INAH. El túnel, que corre en dirección poniente con una ligera desviación al norte, se consideró entonces de origen natural; hoy sabemos que fue construido por los habitantes del valle. En la opinión de Heyden, el túnel ya existía cuando la Pirámide del Sol se construyó, pues la entrada coincide con el centro de la escalera de la pirámide.

De unos 103 metros de largo, el túnel termina en un conjunto de cámaras situadas casi debajo de la cima del monumento. El complejo consta de cuatro cavidades que le dan forma de flor. El túnel sufrió varias modificaciones con el propósito de transformar el acceso a las cámaras: se levantó una serie de muros, que fueron seccionando y tapando el camino; también se construyeron techos. Este proceso se realizó desde el fondo hacia la entrada. Restos de canales de piedra se han hallado al final del cuarto pasaje; posiblemente guardaban relación con el culto al agua.

Hugh Harleston Jr., George T. Baker y sus colaboradores presentaron en 1974 una descripción y reconstrucción hipotética del túnel subterráneo. Este trabajo reviste interés porque ofrece una descripción detallada con datos topográficos y medidas de cada sección, así como una relación de los materiales encontrados y de algunos elementos como muros y canales. Baker y Harleston localizaron el centro del complejo de cámaras en el punto exacto debajo del cuarto cuerpo de la pirámide: a 37,5 metros al oeste respecto del punto central y a

11,9 metros al sur con relación al oeste astronómico. Según Heyden, entre 25 y 30 muros taparon la entrada del túnel; estos autores, en cambio, sostienen que fueron sólo entre 19 y 20. Se han hallado pruebas de que estas paredes fueron destruidas por saqueadores. Para su reconstrucción hipotética, Baker y Harleston la dividieron en 4 secciones.

Heyden plantea la posibilidad de que el túnel debajo de la Pirámide del Sol corresponda a una representación de un Chicomoztoc (sistema de siete cuevas), ya que en algunos códices aparecen representados grupos de cuevas en forma de flor, muy semejantes al conjunto de cámaras hallado bajo la pirámide. Además, los oráculos se situaban con frecuencia dentro de cuevas. De hecho, en el Códice Xólotl, del Posclásico, el glifo de Teotihuacan aparece representado por dos pirámides encima de una cueva que encierra un oráculo. El oráculo debió operar como centro de actividades y ceremonias religiosas, que atraían a un gran número de peregrinos a la ciudad.

Otra hipótesis sostiene que el túnel se abrió con el propósito de marcar el lugar preferido para la construcción de un edificio, el asentamiento de un pueblo o la excavación de una tumba. La forma floral del conjunto de cavernas nos remite al significado religioso que tomaba en Teotihuacan el símbolo de la flor. Se utilizaba para representar la creación, la vida, el lenguaje, el canto, la nobleza, el gobierno y algunos dioses; era también un signo calendárico. Posiblemente la forma de flor de cuatro pétalos del túnel guarde relación con los cuatro puntos cardinales; tendría, pues, un significado cosmológico.

Los señores de Teotihuacan

Se desconoce quién o quiénes gobernaron Teotihuacan. No existe acuerdo sobre el sistema de poder. Algunos opinan que se basó en una sola dinastía. Sin embargo, la teoría más aceptada sugiere que se habría instaurado un cogobierno de varios señores; los restos de esos personajes yacerían en el interior de las mayores estructuras de la urbe, la Pirámide del Sol y la Pirámide de la Luna. En esta última se realizaron trabajos

de investigación a cargo de Rubén Cabrera y Saburo Sugiyama, de la Universidad estatal de Arizona. Los enterramientos y ofrendas hallados en el interior apoyan la hipótesis anterior.

La conformación de la Pirámide de la Luna es bastante distinta de la del Sol; resulta difícil, por tanto, estimar la probabilidad de que ésta encierre restos similares a las tumbas descubiertas en aquella. Cabe agregar que, como en la Pirámide de la Luna, en Teotihuacan es común hallar entierros en fosas con muros de roca y rellenas de tierra. Como veremos más adelante, construcciones de este tipo serían más difíciles de localizar mediante la atenuación de muones, pues esta técnica resulta más eficiente para la detección de cavidades (huecos) que de estructuras de mayor densidad.

En resumen, el propósito que motivó la construcción del mayor monumento teotihuacano permanece oculto. Este enigma ha inspirado numerosos estudios, entre ellos varias excavaciones que han reforzado la hipótesis de que la Pirámide del Sol fue concebida sin edificaciones intermedias, a diferencia de la vecina Pirámide de la Luna. Así, la ausencia de una estructura interna ha dejado a los arqueólogos sin una pista que guiara futuras excavaciones. Una situación similar se presentó en la ciudad egipcia de Giza. Al contrario de la Pirámide de Keops, la de Kefrén no daba indicios de contener cámaras mortuorias en su volumen, más allá de la Cámara de Belzoni, ubicada en su base, cerca del eje de simetría. De ahí que Luis Alvarez propusiera el uso de la técnica de atenuación de muones, mediante la instalación de un detector de partículas en la Cámara de Belzoni.

Rayos cósmicos y muones

Los muones, partículas elementales inestables, se inscriben en el grupo de los leptones. De carga eléctrica igual a la del electrón, tienen una vida media muy corta (una millonésima de segundo). La técnica utilizada en este estudio se centra en los muones que resultan de la interacción entre rayos cósmicos y atmósfera terrestre. La penetrabilidad de los muones así producidos es tal que una fracción de su flujo se detecta incluso a kilómetros bajo tierra. Al estar dotados de carga eléctrica, la atenuación del flujo depende de la cantidad de materia atravesada.

Un flujo de radiaciones estelares bombardea la Tierra sin cesar. Son producto de las reacciones nucleares que ocurren en el interior de las estrellas. La fuerza que mantiene unidos a los núcleos atómicos es tan intensa, que, para arrancar uno de los componentes nucleares (un protón o un neutrón), hay que invertir una energía millones de veces mayor que la necesaria para ionizar un átomo. Esa misma energía se recobra (por conservación) en la fusión nuclear que se produce en las estrellas: núcleos ligeros se unen para formar otros de mayor peso, obligados por la compresión que ejerce sobre ellos la atracción gravitatoria.

Las estrellas vienen a ser reactores nucleares naturales, que emiten radiaciones de muy diverso tipo, incluida la luz que observamos en el cielo nocturno o que, en el caso del Sol, sustenta la vida en la Tierra.

Al final de su vida, algunas estrellas explotan formando supernovas que producen flujos importantes de

DETECCION DE RAYOS COSMICOS

Las estrellas emiten flujos importantes de partículas dotadas de carga eléctrica, que bombardean la Tierra sin cesar: el 90 por ciento corresponde a núcleos de hidrógeno, el 9 por ciento a núcleos de helio y el 1 por ciento restante a núcleos más pesados y electrones.

Esos núcleos reaccionan con las moléculas que componen la atmósfera. La reacción violenta genera una cascada de partículas muy inestables, piones sobre todo.



SAMUEL PALACIN FABREGAS (fotografía)

partículas dotadas de carga eléctrica, algunas de energía elevada. El 90 por ciento de las mismas corresponde a núcleos de hidrógeno (protones), el 9 por ciento a núcleos de helio y el 1 por ciento restante a núcleos más pesados y electrones. Para bien de quienes habitamos en la superficie terrestre, hay dos escudos naturales que nos protegen de estas partículas: la atmósfera y el campo geomagnético. El efecto combinado de ambas pantallas hace que sólo una fracción de las radiaciones cósmicas llegue a la superficie terrestre. Esa fracción resulta mínima en la región ecuatorial, donde el apantallamiento ejercido por el campo magnético es mayor.

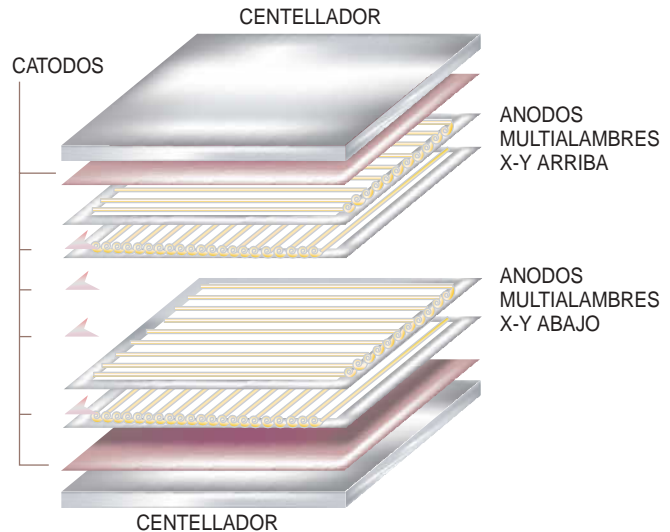
Cabría esperar que, lo mismo que la luz visible, las radiaciones ionizantes que produce el Sol dominaran sobre las provenientes del resto de las estrellas. Sin embargo, la radiación solar carece de energía suficiente para vencer los escudos protectores terrestres. Los rayos cósmicos que nos conciernen aquí son, pues, de origen extrasolar.

Respecto al flujo de núcleos (de hidrógeno, helio, etcétera) que incide sobre la latitud de la ciudad de México, el cociente entre la energía cinética más probable (E) y el número másico del núcleo (A) toma un valor cercano a 8 gigaelectronvolt (GeV). A partir de esta energía, el flujo de iones decrece de forma exponencial conforme aumenta la relación E/A . En la interacción entre esos núcleos y las moléculas que componen la atmósfera, ocurren reacciones violentas que producen partículas muy inestables, los piones.

A nivel del mar, el flujo de muones es de uno por centímetro cuadrado y minuto. En ese flujo se incluyen muones positivos y negativos, siendo los segundos ligeramente más abundantes. En la latitud del Valle de México, los muones presentan una energía cinética media cercana a los 2 GeV. Al igual que los rayos cósmicos que los originan, el flujo de muones de mayor energía decrece de forma exponencial. Respecto a la vertical, el flujo varía poco para ángulos polares inferiores a 45 grados; para inclinaciones mayores cae en picado.

Atenuación de muones

La técnica de localización de cavidades por atenuación de muones se basa en dos conceptos elementales. El primero es que la tasa $\Delta E/\Delta X$ a la que las partículas dotadas de carga eléctrica pierden una energía cinética ΔE al cruzar un espesor ΔX de un material cualquiera, corresponde a una función inversa de la velocidad de la partícula incidente. Puesto que estos muones viajan a velocidades próximas a la de la luz en el vacío c (límite absoluto de velocidad), $\Delta E/\Delta X$ resulta ser casi constante y cercana a 1 GeV por cada 2 metros de tierra atravesados. Por tanto, los 73 metros que deben penetrar los muones en este experimento (65 metros de altura de la Pirámide del Sol, más los 8 metros de profundidad del túnel) implican una energía mínima de incidencia de 36 GeV para que puedan detectarse en el túnel bajo el monumento. Dado que el flujo de partículas decrece exponencialmente al aumentar su energía, los muones que porten energía apenas suficiente para cruzar la pirámide serán los más sensibles a pequeñas variaciones en la cantidad de materia atravesada.



6. EL DETECTOR DE MUONES consta de una serie de elementos. En los extremos superior e inferior, dos plásticos centelladores registran el paso de radiación: cuando ambos se activan a la vez (coincidencia temporal), la señal se considera válida (las demás señales no se deben a la llegada de un muon sino al ruido ambiental). Las cámaras multilámbres determinan la trayectoria del muon: el punto por donde cruza el muon en cada cámara define las coordenadas x e y ; la separación entre las cámaras define la tercera coordenada z .

El segundo concepto clave concierne a la pérdida de energía, que resulta de las interacciones individuales entre las partículas que componen al material. Cada uno de estos “choques” causa una pequeña desviación del rayo incidente. Puesto que la desviación promedio es también función inversa de la velocidad, los muones de menor energía son los más sensibles para la localización de huecos y acumulan una mayor desviación, lo que repercute en la resolución espacial. El diseño de este tipo de experimentos requiere, pues, un compromiso entre la sensibilidad y la resolución espacial.

Para la localización de cavidades ocultas se miden el flujo y la dirección de los muones que llegan al detector. Estas medidas se comparan luego con el resultado de una simulación en la que el volumen investigado tiene una densidad uniforme: si en alguna dirección se detecta un flujo de muones superior al simulado, ello indica que en esa dirección habrá menos materia y, por tanto, quizás exista una cavidad.

La construcción de un modelo teórico requiere un conocimiento preciso de las condiciones experimentales: distribución energética y angular de los muones incidentes, geometría externa de la pirámide y estructura interna (perfil de densidad, cavidades conocidas, etcétera). A partir de estos datos se deducen las dimensiones de la mínima cavidad detectable, los tiempos de medición y otros parámetros.

La información que se obtiene en una tal simulación facilita el diseño del detector. El dispositivo experimental que utilizamos en este estudio recuerda el de Alvarez: es simple y de bajo costo. Para determinar tres puntos a lo largo de la trayectoria de los muones, se emplean seis



7. EQUIPO EXPERIMENTAL para la detección de muones. A la derecha, el conjunto de las seis cámaras multilámbricas con los dos centelladores. Abajo a la izquierda, la electrónica necesaria para

realizar el análisis en tiempo real que se requiere para determinar la trayectoria de los muones. Arriba a la izquierda, el sistema de control de gases que alimenta las cámaras multilámbricas.

cámaras multilámbricas (CMA) con una zona sensible de 1 metro \times 1 metro. Estas se colocan por pares, con los alambres de una cámara perpendiculares a los de la siguiente. Se determinan así un par de coordenadas (x,y); la ubicación vertical fija la tercera coordenada (z). Los muones se identifican mediante dos centelladores plásticos que cierran, a modo de "sándwich" (uno encima y otro debajo), el conjunto de cámaras multilámbricas. Los muones son las únicas partículas capaces de atravesar por completo el detector. Así, para eliminar el ruido de fondo, causado por la radiación ambiental, se consideran sólo las señales que presentan coincidencia temporal en ambos centelladores; los dos se activan a la vez. La simulación determina el espaciamiento entre los alambres en las CMA y otros parámetros de importancia para el dispositivo de detección.

De una comparación teórica entre el dispositivo experimental que Alvarez utilizó en Giza y el que se ha instalado en Teotihuacan se desprende que, para tiempos de observación iguales, el proyecto mexicano obtendrá un recuento semejante, aunque con un detector menor; la superficie de éste corresponde a una cuarta parte de la superficie del empleado por Alvarez. Ello se debe, en parte, a la diferencia de altitudes: el flujo de muones es mayor en Teotihuacan que en Giza, que se encuentra al nivel del mar. Además, la menor altura de la Pirámide

del Sol (la mitad de la de Kefrén) implica una atenuación reducida. Asimismo, la sensibilidad que se espera en el experimento mexicano es mayor que en el caso egipcio; por una razón poderosa: una cavidad de una misma dimensión representa, en un caso, una fracción mayor de la altura total que en el otro. Otra ventaja del estudio en la Pirámide del Sol se debe a los túneles internos, que sirven de estructuras de calibración.

Sin embargo, el experimento mexicano presenta otros retos. La forma externa de la pirámide es más compleja, y difícil de simular, que la de Kefrén. La densidad interna tiene asociada una mayor incertidumbre que en el caso egipcio, donde los materiales de construcción se conocían mejor. Por último, a juzgar por lo que se observa en los muros del túnel que lleva a la Cámara de Belzoni y en Keops, los materiales presentan una distribución más uniforme.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, estimamos que necesitaríamos un año de mediciones para detectar cavidades con una altura mínima de 75 centímetros. Cabe aclarar que el hallazgo de una cavidad en esta montaña de tierra quizá no tenga interés arqueológico, si se trata de un simple asentamiento geológico.

Puede ocurrir también que la estructura arqueológica de la Pirámide del Sol no corresponda a un hueco, sino a una tumba llena de tierra, como ya se ha encontrado

en la Pirámide de la Luna. Si bien esta técnica permite localizar zonas con una densidad superior a la media, ofrece una sensibilidad menor; asimismo, podría implicar tiempos de medida demasiado largos. Y, de encontrar indicios de una estructura, la falta de estereoscopia inherente a los resultados de un solo punto de observación obligaría a desplazar la posición del detector a lo largo del túnel y repetir las mediciones para mejorar la ubicación tridimensional.

El proyecto de medición de atenuación de muones en la Pirámide del Sol se divide en varias etapas. Contamos ya con el diseño de los dos tipos de detectores (cámaras multialámbricas y centelladores), la adquisición de los módulos de electrónica, y la construcción, ensayo e instalación *in situ* de las dos placas centelladoras. La primera cámara multialámbrica se construyó y ensayó con éxito en

2005; en 2006 se construyeron las otras cinco. El detector completo se encuentra ya integrado y en fase de calibración. También se ha acondicionado un espacio en el túnel de la pirámide: seguro, electrificado (la toma de electricidad más cercana se encuentra a un kilómetro de distancia) y con baja humedad. Nos proponemos ahora la instalación de una conexión inalámbrica de transmisión de datos y control telemétrico.

Por fin, cabe reseñar que la colaboración multidisciplinar de arqueólogos, físicos e ingenieros en este proyecto ha resultado un reto enorme y muy gratificante para todos los participantes. Más allá de la lista de autores, se ha contado con la participación de numerosos colaboradores anónimos. A todos estos voluntarios, en especial a los estudiantes de licenciatura y a los técnicos, ofrecemos nuestra gratitud.

Los autores

Arturo Menchaca y **Linda Manzanilla** son los responsables del proyecto que se describe en el artículo. Menchaca dirige el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México. Manzanilla es investigadora del Instituto de Investigaciones Antropológicas de la UNAM. **Rubén Alfaro**, **Ernesto Belmont**, **Varlen Grabski**, **Arnulfo Martínez** y **Andrés Sandoval** son investigadores del departamento de Física Experimental de la UNAM. **Matías Moreno** pertenece al departamento de Física Teórica de la UNAM. **Azucena Cervantes** es arqueóloga y estudiante de doctorado en el Instituto de Física. **J. Manuel López** es doctor en ingeniería.

Bibliografía complementaria

- EXPLORACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE MONUMENTOS ARQUEOLÓGICOS EN TEOTIHUACAN. L. Batres, México, 1908.
- LA POBLACIÓN DEL VALLE DE TEOTIHUACAN. M. Gamio, 3 vols. Secretaría de Fomento; México, 1922.
- SEARCH FOR HIDDEN CHAMBERS IN THE PYRAMIDS. L. W. Alvarez, J. A. Anderson, F. E. Bedewi, J. Burkhard, A. Fakhry, A. Girgis, A. Goneid, F. Hassan, D. Iverson, G. Lynch, Z. Miligy, A. H. Moussa, M. Sharkawi, y L. Yazolino en *Science*, vol. 167, págs. 832-839, 1970.
- TEOTIHUACAN 80-82: PRIMEROS RESULTADOS. Dirigido por R. Cabrera, I. Rodríguez y N. Morelos, Instituto Nacional de Antropología e Historia; México, 1991.
- TEOTIHUACAN. E. Matos en *Arqueología Mexicana*, vol. II, n.º 4, págs. 75-79, 1994.
- ZONA DEL ALTIPLANO CENTRAL CLÁSICO. Linda Manzanilla en *Historia Antigua de México*, dirigido por Linda Manzanilla y Leonardo López Luján, INAH-UNAM-Miguel Angel Porrúa, vol. II, págs. 203-239, 2001.
- GOBIERNO CORPORATIVO EN TEOTIHUACAN: UNA REVISIÓN DEL CONCEPTO DE "PALACIO" APLICADO A LA GRAN URBE PREHISPÁNICA. Linda Manzanilla en *Anales de Antropología*, vol. 35, págs. 157-190; UNAM, 2002.
- A MUON DETECTOR TO BE INSTALLED AT THE PYRAMID OF THE SUN. R. Alfaro-Molina, E. Belmont-Moreno, A. Cervantes, V. Grabsky, J. M. López-Robles, L. Manzanilla, A. Martínez-Dávalos, A. Menchaca-Rocha y M. Moreno en *Revista Mexicana de Física*, vol. 49, supl. 4, págs. 54-59; 2003.
- IMPROVING MEPC DELAY LINE READOUT BY WAVEFRONT ANALYSIS. J. M. López-Robles, R. Alfaro-Molina, E. Belmont-Moreno, V. Grabsky, A. Martínez-Dávalos y A. Menchaca-Rocha en *IEEE Transactions on Nuclear Sciences*, vol. 52, págs. 2841-2845; 2005.