

Arqueometría: la ciencia al servicio del arte



La moderna tecnología permite conjunciones insospechadas. En este caso, la de la física con la arqueología, en técnicas como la microscopía electrónica, que nos permite descifrar el enigma de un bello pigmento de la antigüedad: el azul maya.

**María Dolores Tenorio
y Belem Méndez-Garrido**

Alfonso Caso, uno de los arqueólogos más notables de México, siempre invitó a reflexionar sobre los valores del patrimonio arqueológico. Frecuentemente le preguntaron si debían conservarse los restos de las civilizaciones antiguas y él respondía con otra pregunta, que siempre debería hacerse: “¿Destruiríamos un libro original y único en el que se describiera el modo de vida de nuestros padres, en el que se explicara cómo fueron inventados los instrumentos que ahora usamos, cómo se empezaron a cultivar las plantas que ahora nos alimentan, en suma, la historia de nuestra cultura?”.

Los objetos ligados a los antecedentes culturales de la humanidad se distinguen por su importancia y significado trascendental para el individuo, grupo, nación o para la humanidad, como prototipo de valores culturales cuya finalidad es transmitir a las generaciones futuras los conocimientos, valores, conceptos, sentimientos y pensamientos abstractos representados con estas porciones de materia. Los restos materiales que conforman el patrimonio arqueológico de un país son producto de milenios de

desarrollo; resultado de una compleja evolución cultural y tecnológica. El estudio de artefactos de cerámica, objetos de obsidiana, piedra, hueso, metales, piedras preciosas, textiles, fibras vegetales, pigmentos, colorantes naturales, estucos, estelas de piedra y otros, aporta información para determinar las habilidades tecnológicas desarrolladas por civilizaciones antiguas.

México tiene la fortuna de contar con un rico patrimonio cultural, entre el que se distingue el arte prehispánico. Los artesanos del México antiguo llaman la atención por sus habilidades en el manejo de materiales como la turquesa, el jade, la concha y el coral, así como los metales; desarrollaron técnicas metalúrgicas únicas que han sido comparadas en complejidad con las de Perú, Colombia, Panamá y Costa Rica.

El avance tecnológico y científico apoya fuertemente la investigación de los vestigios materiales de las culturas antiguas con ayuda de la ciencia denominada *arqueometría*, que representa la interfase entre la historia del arte y la arqueología con las ciencias naturales, la física experimental moderna y la química analítica

Sin excepción, todos los objetos y artefactos creados por el hombre tienen principios operacionales utilitarios, y significado y sensibilidad estética relacionados a su vez con un diseño y propósito utilitario, social o ideológico. Por esta razón, organismos internacionales, museos, universidades y la sociedad entera muestran gran preocupación por la conservación y preservación del patrimonio cultural de la humanidad. Actualmente, el avance tecnológico y científico apoya fuertemente la investigación de los vestigios materiales de las culturas antiguas con ayuda de la ciencia denominada *arqueometría*, que representa la interfase entre la historia del arte y la arqueología con las ciencias naturales, la física experimental moderna y la química analítica.

Para la caracterización del patrimonio cultural se aplican técnicas convencionales y nucleares tales como la activación neutrónica, la difracción de rayos X, la fluorescencia de rayos

X, la emisión de rayos X inducidos con protones y la microscopía electrónica de barrido (de la cual hablaremos más ampliamente), entre otras.

EL MICROSCOPIO EN ARQUEOLOGÍA

El deseo de ver las partes que conforman los objetos es inherente a la curiosidad humana. Esto incluye querer analizarlos a escala microscópica: cada uno de nosotros siempre ha mostrado fascinación cuando observa la naturaleza al través de una lupa, un microscopio óptico, o cualquier instrumento que permita observar cada vez con mayor detalle los objetos pequeños. Esta curiosidad fue precisamente la que condujo al holandés Zacharias Janssen a concebir el microscopio óptico compuesto.

En la búsqueda de herramientas útiles en el análisis de la estructura de materiales que presentaran una resolución (poder de aumento) mayor que la alcanzada por un microscopio óptico, Ernest Ruska desarrolló un microscopio en el que un haz de electrones era usado como fuente de iluminación, y lentes electromagnéticas en lugar de lentes de vidrio.

Posteriormente el microscopio electrónico de barrido fue construido por el físico alemán Manfred von Ardenne en 1938, y la compañía británica Cambridge Instruments comenzó a distribuirlo comercialmente en 1965. Con este aparato se puede formar la imagen de la superficie de la muestra, ya que su profundidad de foco es mucho mayor que en un microscopio óptico, razón por la cual esta técnica da una impresión más realista de la imagen tridimensional. El microscopio de barrido es muy útil para estudiar las características morfológicas y topográficas de la muestra. Su uso se ha popularizado, ya que su manejo es relativamente sencillo y pueden adaptarse fácilmente otros aditamentos para obtener resultados adicionales, como por ejemplo un detector de rayos X, y de esta forma llevar a cabo análisis elementales de las muestras.

El funcionamiento del microscopio electrónico de barrido (figura 1) se basa en un haz de electrones de sección transversal pequeña y de alta energía que barre la superficie de la muestra y genera punto por punto una imagen magnificada. Los electrones son emitidos por un cañón y dirigidos hacia la muestra; rebotan en ella (se retrodispersan) y son recolectados en los detectores, que forman y mandan la imagen al monitor de la computadora. Los electrones emitidos en un punto son recolectados por medio de detectores y utilizados para mandar la imagen a un monitor. Esta imagen representa las características topográficas de

la superficie de la muestra; por tanto, la imagen en el monitor del microscopio electrónico de barrido es un mapa de las intensidades de los electrones emitidos por la superficie de la muestra que se observa.

La intensidad del haz retrodispersado procedente de la muestra está determinada principalmente por la probabilidad de que un electrón sea absorbido. La intensidad del haz retrodispersado aumenta cuando se incrementa el número atómico de los elementos que forman al sólido; esto nos permite detectar zonas de diferente composición en el material.

El microscopio electrónico de barrido presenta las siguientes ventajas:

- a) La brillantez de la imagen no disminuye con la ampliación, lo cual es un problema serio en otros microscopios.
- b) No hay rotación de la imagen al incrementar la ampliación.
- c) Las fotografías se toman en forma externa al sistema de vacío del microscopio; esto elimina posibles contaminaciones producidas por la desgasificación de la película fotográfica.
- d) Pueden ser adaptados fácilmente varios sistemas de análisis o de detección, sin tener que adaptar o modificar el diseño del microscopio.

Al bombardear la muestra con los electrones, se emiten rayos X, por lo que, al adaptar un espectrómetro de dispersión de energía de rayos X al microscopio, se construye un perfil de intensidades y se conocen tanto los elementos que componen la muestra como su concentración, es decir, se lleva a cabo un análisis químico.

Otra señal que puede ser procesada para obtener información sobre la composición química de la muestra es la producida por los electrones Auger, llamados así en honor a su descubridor. Esta señal se origina cuando el átomo, excitado por el haz incidente, regresa a un estado de energía menor emitiendo uno de sus electrones, en vez de rayos X. Los electrones se caracterizan por tener valores de energía discretos, bien definidos, que corresponden al elemento que los emite, por lo que con

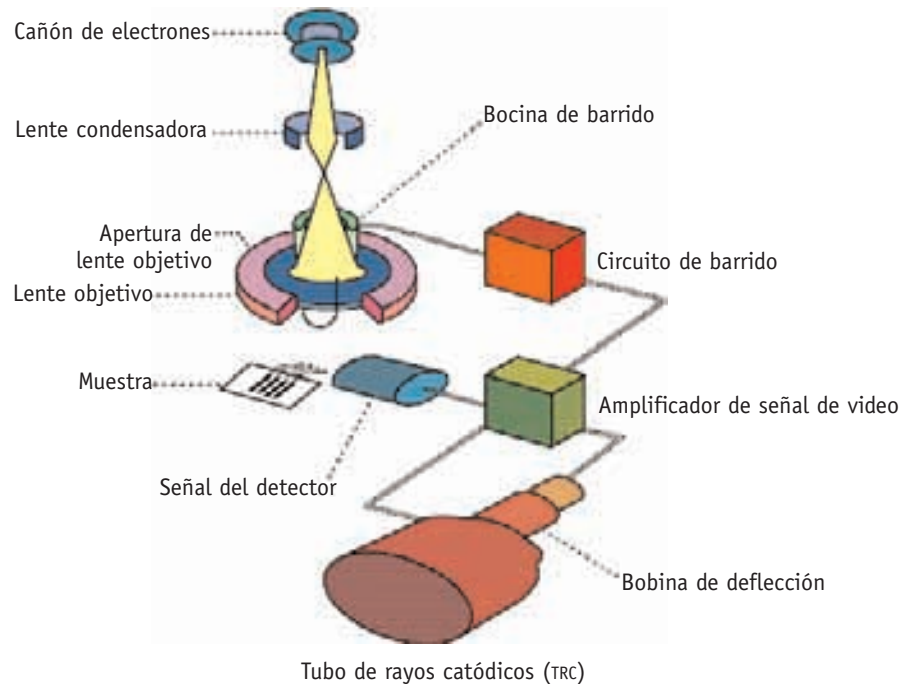


Figura 1. Diagrama de un sistema de microscopio electrónico de barrido.

Los electrones se caracterizan por tener valores de energía discretos, bien definidos, que corresponden al elemento que los emite

Las primeras manifestaciones artísticas de pintura sobre piedra (no sobre muros) las presenta la cultura olmeca

estos valores de energía se pueden identificar los elementos presentes en la muestra analizada.

La preparación de muestras es uno de los aspectos más críticos para la obtención de buenos resultados en microscopía electrónica. Para el microscopista involucrado en estudiar muestras o piezas arqueológicas de gran valor histórico, la tarea es más difícil, debido a que las piezas pueden ser únicas e imposibles de reproducir. Cuando se analizan muestras que no conducen la corriente eléctrica, el haz de electrones, al interactuar con la muestra, es absorbido y los electrones se acumulan en la superficie y dan lugar a la formación de una cargada, que presenta la formación de imágenes de baja calidad. En este caso es necesario cubrir la muestra con una capa metálica. Los metales comúnmente usados son oro y paladio. Esta capa se aplica sobre la muestra no conductora con un evaporador al vacío. Si la muestra es metálica, esta preparación no se requiere, y simplemente es necesario tener buen contacto eléctrico entre la muestra y el soporte; esto se logra con la utilización de una pintura coloidal de plata.

EL AZUL MAYA: LA MICROSCOPIA ELECTRÓNICA EN EL ESTUDIO DE LA PINTURA MURAL

La microscopía electrónica es una herramienta muy importante en el estudio de material arqueológico. En el cuadro 1 se dan ejemplos de la aplicación de la microscopía electrónica de barrido y de la técnica de microanálisis.

La pintura mural es la forma más efímera del arte prehispánico. Puede considerarse como antiguos códigos incorporados a muros; algunas pinturas tratan de religión, dioses y astronomía; otras fijan hechos históricos, genealogías de familias reales y costumbres ligadas a la vida humana desde el nacimiento hasta la muerte. Las primeras manifestaciones artísticas de pintura sobre piedra (no sobre muros) las presenta la cultura olmeca; sin embargo, la pintura mural prehispánica inició su desarrollo en el periodo clásico medio y clásico tardío en Teotihuacan (400-750 d.C.), difundándose más tarde en el epiclásico y posclásico en las regiones del altiplano, la Huasteca y zona maya (750-1521, d.C.).

En el estudio de pigmentos, el azul maya es uno de los más investigados. El empleo ritual del color azul se asocia entre los mayas y otros

CUADRO 1.

Ejemplos de investigaciones realizadas con microscopía electrónica.

Tema de investigación	Autor
Estudio de la pintura mural de las culturas prehispánicas en Mesoamérica.	Magaloni <i>et al.</i>
Estudio de la pintura del <i>Bautizo de Cristo</i> , siglo XVIII, de la colección de Emita de Santa Inés, España.	Andrés Moya <i>et al.</i>
Estudio del deterioro de la Alambra en Granada, España.	De la Torre <i>et al.</i>

pueblos mesoamericanos con el agua, el sacrificio y la quema de copal. El uso del color azul es tardío, posiblemente debido a que no se habían localizado fuentes de color azul permanente como la azurita o arcillas, que son la materia prima del azul maya. Este último fue descubierto en las pinturas murales de Chichén Itzá por Merwin (1931), quien notó sus características especiales; más tarde Gettens (1962) reveló que no se parece a ningún otro pigmento conocido, y lo nombra “azul maya”. Este investigador siempre creyó que el azul maya era un mineral natural de color azul, por su extraordinaria resistencia a los ácidos y álcalis diluidos, concentrados y en ebullición, al agua regia, los disolventes, agentes oxidantes y reductores, al calor moderado (hasta 259 grados centígrados) y también a la biocorrosión. Se ha propuesto y aceptado que este pigmento está formado por una matriz arcillosa (la arcilla fibrosa denominada palygorskita) y un tinte orgánico (índigo) y que alcanza esta estabilidad gracias a la aplicación de calor; Van Olphen sugiere el uso de temperaturas de 75, 105 Y 150 grados centígrados en tiempos variables que podrían ser desde horas hasta varios días.

La identificación completa del pigmento, su técnica de fabricación y de utilización en la pintura son incógnitas que apasionan a muchos científicos del mundo. De los numerosos estudios realizados a la fecha, se ha aceptado la proposición de que se trata de un complejo de arcilla y colorante orgánico. Shepard y Gottlieb (1962) reconocen que la resistencia a los ácidos prueba que el color no es resultado de un recubrimiento superficial de tinte sobre las partículas de arcilla, lo cual apoya la hipótesis de formación de un complejo. Beck y Wesley (1964) sugieren una posible relación del azul maya con el azul seri, preparado con resina de guayaco y montmorillonita. Van Olphen (1966) reporta que el contenido del tinte en el pigmento es menor de 0.5 por ciento, lo que indica que el tinte es *adsorbido* en la superficie externa de la arcilla y no *absorbido* dentro de sus canales, y que la estabilidad del complejo se alcanza con calentamiento entre 75 y 105 grados centígrados. En 1967, Kebler y Thissen observaron que la fijación del índigo coincide con la eliminación del agua, y alcanza una concentración del 3 por ciento en el pigmento, concluyendo que se trata de un complejo de palygorskita-índigo. Por su parte, Cabrera (1969) dice haber separado, aislado e identificado índigo en muestras de azul maya, y que el pigmento debe sus propiedades a la palygorskita. Torres Montes (1976)





Figura 2. Pintura mural de Cacaxtla.

Se han encontrado al menos tres regiones con materias primas de utilización prehispánica donde el azul maya pudo haber sido manufacturado

reportó que el tiempo y la temperatura utilizados en la obtención del azul maya tienen una relación inversa, por lo que una combinación adecuada de ellos producirá el pigmento a una velocidad lenta o rápida. Por otra parte, Reyes Valerio (1993) aplicó diversos métodos analíticos para corroborar los datos históricos reportados, confirmando que la arcilla es indispensable en la producción del pigmento en cuestión, y la variación del tono depende del tiempo de remojo de las hojas de la planta, la cantidad de hojas y arcilla y el influjo del alumbre. José Yacamán *et al.* (1996) reportaron por primera vez la presencia de nanopartículas (partículas submicroscópicas) metálicas de hierro, cromo, manganeso, titanio y vanadio, las cuales podrían influenciar fuertemente las propiedades ópticas del material y jugar un papel importante en el color;

también explican la formación de una super-red, debido a la absorción de las moléculas de índigo dentro de los canales de la estructura cristalina de la palygorskita, lo que podría explicar su resistencia a la corrosión. En estudios más recientes, se ha aplicado radiación de un sincrotrón para refinar la estructura de la palygorskita y determinar impurezas y separar fases mezcladas de la misma arcilla.

Algunos investigadores piensan que las circunstancias para el descubrimiento del azul maya debieron ser poco probables, a pesar de que su empleo fue generalizado en Mesoamérica y no ha sido encontrado en otras partes del mundo. Otros sugieren que su lugar de origen debió ser único, y que se popularizó y difundió por el comercio, extendiéndose progresivamente en función del tiempo y de las relaciones culturales y comerciales entre inventores, vecinos y contemporáneos, fabricándose después en otras regiones que poseían la materia prima y habían aprendido la tecnología.

Se han encontrado al menos tres regiones con materias primas de utilización prehispánica donde el azul maya pudo haber sido manufacturado: en el norte de la península de Yucatán, en Sacalum y Ticul donde existe palygorskita (Arnold y Bohor); al occidente de la península de Yucatán, en el estado de Campeche, donde se encuentra sepiolita y mezclas de sepiolita-palygorskita, y una tercera variedad arcillosa, procedente de una región desconocida y encontrada en muestras procedentes de Oaxaca.

La presencia más segura de este pigmento se encuentra, a partir del siglo VI (principios del clásico tardío) hasta la época colonial en el siglo XIX.

CACAXTLA

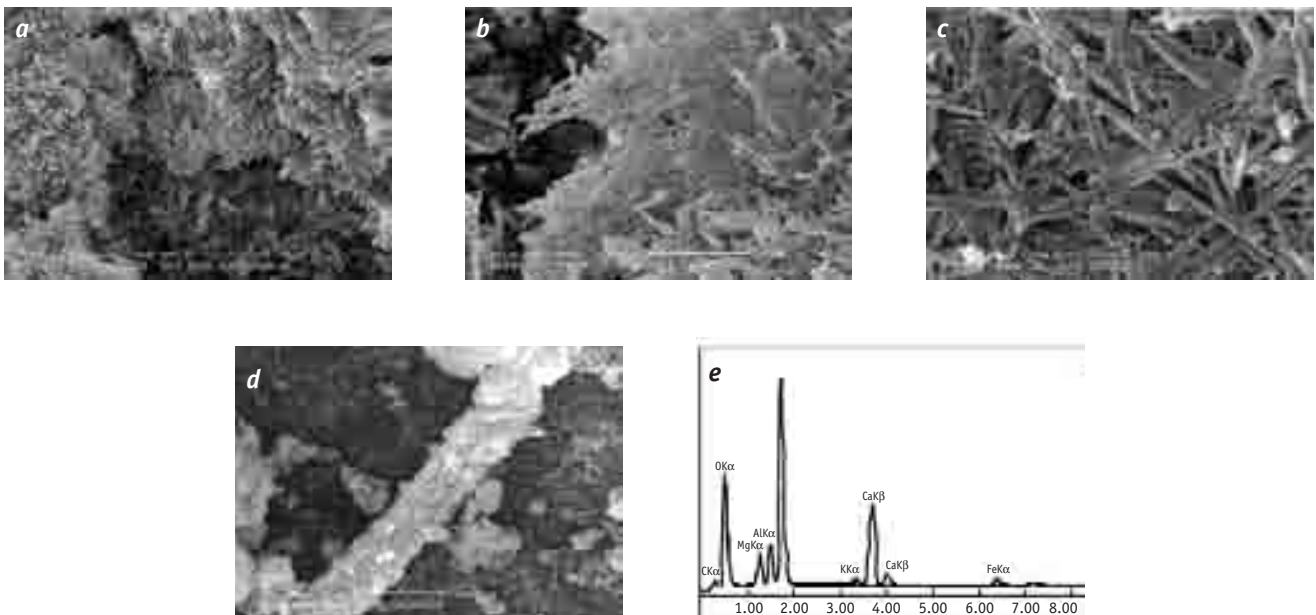
Entre los años 100 y 650 d.C., los asentamientos humanos de Tlaxcala estuvieron en contacto con el occidente de México, la costa del Golfo y la mixteca baja, hecho que se ve reflejado en los motivos representados en su pintura mural.

Las culturas indígenas conocían el uso de la cal antes del descubrimiento de América. Encalaban los muros para estabilizarlos, y en ellos el estrato interno es un muro de adobe. El siguiente, denominado repello o enfoscado, es un aplanado grueso de cal y arena. Junto a éste encontramos un enlucido fino de cal, conocido como estuco, y finalmente la capa de pintura, que puede estar formada por una o varias capas de pigmento.

Al estudiar el pigmento azul maya de una muestra proveniente de una pintura mural de Cacaxtla con el microscopio electrónico de barrido, se obtienen imágenes como las que se observan en la figura 3. En las micrografías se observan fibras cortas, con un diámetro aproximado de 90 a 200 nanómetros (millonésimas de milímetro) y longitudes de 1.2 a 2.8 micrómetros (milésimas de milímetro). En algunos casos éstas fibras se encuentran formando agrupaciones apiladas (figura 3a y 3b) y en otros están orientadas al azar, como se puede apreciar en la figura 3c. También se encontraron crecimientos de

La presencia más segura de este pigmento se encuentra, a partir del siglo VI (principios del clásico tardío) hasta la época colonial en el siglo XIX

Figura 3. Micrografía de pigmento azul maya; *a), b)* y *c)*, cristales fibrosos a diferentes ampliificaciones; *d)* crecimiento de calcita acicular; *e)* microanálisis de fibras.



El pigmento azul
está constituido
principalmente por fibras,
a las que se sometió
a un análisis elemental

partículas de calcio con morfología definida, asociada principalmente a la calcita acicular (figura 3d). El pigmento azul está constituido principalmente por fibras, a las que se sometió a un análisis elemental. En este análisis se encontraron principalmente elementos como silicio, oxígeno, aluminio y hierro; los elementos carbono, calcio y potasio provienen del soporte, que en este caso es palygorskita (figura 3e).

De acuerdo con estos resultados se puede determinar si un pigmento azul se puede clasificar como azul maya, de acuerdo a los estudios que se realicen con microscopía electrónica de barrido. Esto gracias a que una característica importante del azul maya son las fibras que se obtienen de la palygorskita al ser observada en el microscopio electrónico de barrido, así como también la presencia de magnesio en el análisis elemental de las fibras.

La técnica de microscopía electrónica es así una herramienta que se complementa con otras

técnicas para llevar a cabo estudios detallados de materiales en general, y en particular de restos materiales de interés arqueológico.

Bibliografía

- De la Torre López, M. J., E. Sebastián Pardo y J. Rodríguez Gordillo (1995), en *Proceeding of XVII Congress of the Spain Electron Microscopy Society*, 328, University of Oviedo Publications.
- José Yacamán, Miguel y José Reyes (1995), *Microscopía electrónica. Una visión del microcosmos*, México, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología/Fondo de Cultura Económica.
- Ortega Avilés, Mayahuel (2003), *Caracterización de pigmentos prehispánicos con técnicas analíticas modernas*, tesis de doctorado en Ciencias de Materiales, Universidad Autónoma del Estado de México.
- José Yacamán, Miguel y Jorge A. Ascencio (2000), *Electron microscopy and its application to the study of archaeological materials and art preservation*, capítulo 14.
- Cliberto, Enrico y Giuseppe Spoto, *Modern analytical methods in art and archaeology*, Chemical Analysis Series, vol. 155, 405-443.
- Magaloni, D., M. Aguilar, y V. Castaño (1991), *Mat. Res. Soc. Symp. Ser.*, 185, Materials Research Society Publications.
- San Andrés Moya, M., M. I. Baez, D. Cornejo Sastre, y J. N. Baldonado (1995), en *Proceedings of XVII Congress of the Spanish Electron Microscopy Society*, 332, University of Oviedo Publications.

María Dolores Tenorio es originaria de Puebla, estudio la carrera de químico en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, es doctor en Química y Ciencias Físicas de la Universidad Louis Pasteur Strasbourg, Francia. Ha participado en investigaciones en el campo de la radioquímica, colisiones atómicas y arqueometría. Es miembro de Sistema Nacional de Investigadores.
dte@nuclear.inin.mx

María Belem Méndez Garrido originaria del Distrito Federal, estudió la carrera de Física en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Ha trabajado en los laboratorios de calibración de detectores de radiación y dosimetría interna. Actualmente colabora en el análisis de piezas arqueológicas con haces de iones en el departamento del acelerador Tandem Van de Graaff del ININ.
bemg@nuclear.inin.mx