

120



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
FACULTAD DE QUÍMICA

**ALTERNATIVAS PARA EXPLICAR
EL ORIGEN DEL AZUL MAYA**

298414

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA

P R E S E N T A :

VERÓNICA MARTÍNEZ GÓMEZ

México, D.F.

2001.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente

Dr. José Guadalupe Pérez Ramírez

Vocal

Dr. José Saniger Blesa

Secretario

Dr. Raúl Alejandro Valenzuela Monjaras

1er Suplente

Dr. Luis Emilio Orgaz Baque

2do Suplente

Dr. Carlos Federico Bunge Molina

Sitio donde se desarrolló el tema:

Instituto de Física, UNAM



ASESOR

Dr. José Guadalupe Pérez Ramírez



SUSTENTANTE

Verónica Martínez Gómez

A MI FAMILIA

con cariño

Gracias
Verónica M.G.

Al Dr. J.G. Pérez Ramírez (X. Bokhimi)
por su apoyo, consejos y enseñanzas
durante mi carrera y en la elaboración de esta tesis

Gracias
Verónica M.G.

*Gracias al Instituto de Física de la UNAM
Por facilitarme el equipo e instalaciones para la elaboración de esta tesis.*

*Gracias a la Dra. Margarita Portilla de la Facultad de Química de la UNAM
Por ayudarme con las mediciones de TGA, DTA y DSC.*

*Gracias al Dr. José Saniger del Centro de Instrumentos de la UNAM
Por facilitarme el equipo de espectroscopia y por enseñarme que aun existe gente
con ganas de ayudar a sus semejantes.*

*Gracias a la Dra. América Vázquez del Centro de Instrumentos de la UNAM
Por sus consejos y asesoría en la interpretación de resultados y por tenderme
siempre su mano amiga.*

*Gracias a Manuel Aguilar del Instituto de Física de la UNAM
Por su apoyo.*

*Nuevamente Gracias
Verónica MG*



Pintura mural elaborada con Azul Maya

Hombre Pájaro
Pórtico Edificio A
Cacaxtla, Tlaxcala

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
Capítulo I. ANTECEDENTES DEL AZUL MAYA	4
I.1 Localización	5
I.2 Investigación Cronológica	6
Capítulo II. DESARROLLO EXPERIMENTAL	14
II.1 Difracción de Rayos X	14
II.2 Análisis Termogravimétrico	16
II.3 Espectroscopía de Absorción	17
II.4 Estabilidad Química	18
Capítulo III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
III.1 Pintura Original de Azul Maya	19
III.2 Sacluum	23
III.3 El color azul en el México Prehispánico	28
Capítulo IV. CONCLUSIONES	62
REFERENCIAS	64

INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente trabajo es contribuir al entendimiento de la pintura del México Antiguo llamada Azul Maya, partiendo de un contexto global sobre el conocimiento que se tenía de tintes, tintas, y pigmentos en ese entonces.

De los estudios previos del Azul Maya¹⁻⁵ se ha demostrado por difracción de rayos X que el mineral paligorskita es uno de sus componentes; como este mineral es blanco, queda aún abierto el origen del color. Hay propuestas que éste es producido por un componente orgánico, siendo el más aceptado hasta la fecha el índigo^{1,3,5-9}.

La paligorskita es un mineral que abunda en la Península de Yucatán y se le conoce actualmente en Lengua Maya como *sacluum*, que es el mismo nombre con que fue registrado en el siglo XVI en el Calepino de Motul¹⁰. Con poca probabilidad de equivocarse, permite decir, que era el nombre con el que los pobladores mayas de la época (Siglo VIII) de la elaboración de los murales en Chichén Itzá, Palenque y Cacaxtla lo conocieron. Por lo cual sería digno adaptar este nombre para designar a este mineral. Es importante mencionar que en el siglo XVI se registra el uso de este mineral como barniz para pintar que, como veremos en el capítulo correspondiente, aún se conserva en el Estado de Campeche.

La mejor y más fiel información documental sobre el conocimiento de las pinturas empleadas en el México prehispánico está en las fuentes primarias. Por el tiempo en que fueron elaboradas y por su extensión, de ellas destacan dos: el “Códice Florentino” de Fray Bernardino de Sahagún¹¹ y la “Historia Natural de Nueva España” de Francisco Hernández¹².

En estas fuentes se describen tanto la pinturas como la forma de elaborarse y de recubrirse. Aunque se mencionan todos los colores, en particular se menciona el color azul, precisando en algunos casos su aplicación específica; aunque, desgraciadamente, no se menciona cual de ellas era la empleada para decorar los murales, lo que hubiera facilitado la identificación del Azul Maya. En los textos se mencionan tres pinturas azules: *matlalli*, *texotli*, y *tlaceuilli*. Dado el objetivo del presente trabajo, nos concretaremos sólo a estos colores.

El *matlalli* y el *texotli* se extraían de una flor azul; en los textos se aclara que el *texotli* se empleaba para teñir textiles y para decorar el cuerpo en algunas festividades. El nombre de la planta que daba esta flor, que se caracterizaba por tener sólo tres pétalos, se identificaba como *matlalxochitl*. Esto permitió identificar un dibujo de la misma en el "Códice de la Cruz-Badiano" de Martín de la Cruz y Juan Badiano¹³, que es otra fuente primaria y contemporánea a las dos arriba mencionadas. Con esta imagen fue posible reconocer la planta actualmente y poder obtener la materia prima para la elaboración de estas pinturas azules.

La pintura *tlaceuilli*, según las fuentes primarias, se extraía de las hojas de una planta llamada *xiuhquilitl*, mencionándose dos especies diferentes de esta planta: el *xiuhquilitl pitzahuac*, y el *xiuhquilitl patlahuac*. La primera, por la calidad del colorante que proporcionaba, se siguió explotando abundantemente hasta el siglo XIX, en que la molécula que da el color azul de esta planta fue sintetizada; aunque en México aún durante la primera mitad del siglo XX se empleaba abundantemente para uso doméstico. Es por ello que sabemos que esta planta produce la llamada piedra de añil que comparada con las fuentes primarias, se identifica con el *tlaceuilli*.

Como el propósito del presente trabajo es contribuir al conocimiento sobre el Azul Maya, y se sabe que la paligorskita es un elemento de esta pintura, mezclaremos este mineral con los colorantes *matlalli* y *tlaceuilli* para producir pinturas azules, que se compararan también, con las elaboradas con índigo sintético.

En las fuentes primarias se describe también el uso de otras materias primas que se mezclaban en la elaboración de las pinturas.

De ellas destacan el *tequixquilt* que al mezclarse aumenta el pH de la solución, y el *tlabócotl*, que por el contrario disminuye el pH. Este último identificado desde las fuentes como alumbre. Como la base sobre la cual se depositaban las pinturas era hidróxido de calcio que se producía de la cal (*tenextli*)¹⁴, también se estudió el efecto de éste sobre las pinturas azules y sus materias primas.

De acuerdo a las fuentes primarias, para darle firmeza a la pintura al ser colocada se mezclaba con barnices. De ellos se mencionan tres: *axin*, aceite de *chia*, y *tzacutli*. Dado que una de las características del Azul Maya, es su resistencia a ser atacado por ácidos, creemos conveniente analizar el efecto de estos barnices en las pinturas que desarrollemos. Por su accesibilidad, sólo los dos primeros serán analizados.

Capítulo I

ANTECEDENTES DEL AZUL MAYA

En el México prehispánico el arte se combinó con la ciencia; Un ejemplo de esto son las pinturas caracterizadas por un bonito color y excelentes propiedades químicas: entre éstas se encuentra el Azul Maya.

Esta pintura fue divulgada por E. H. Morris et al.⁴ (1931) cuando la encontró en murales de las ruinas mayas de Chichén Itzá en Yucatán y años más tarde Gettens y Stoud¹⁵ (1942) la nombran **Azul Maya**, al pensar erróneamente que únicamente era utilizada por los mayas de Yucatán. Posteriormente el Azul Maya se encontró en otras partes de la Republica; Por ejemplo en Cacaxtla y el Valle de México, sin embargo el nombre permaneció. Creemos conveniente remarcar que el nombre de la pintura podría ser **Azul Mexicano** pues al llamarlo Azul Maya estamos limitándolo a una región y a una de nuestras culturas.

Además de decorar murales el Azul Maya se empleó para pintar piezas cerámicas y códices variando las tonalidades desde el azul cielo hasta el azul verdoso, todas con un brillo inigualable. De hecho algunas de ellas pueden apreciarse en museos y exposiciones de la cultura maya y azteca. El interés por encontrar su origen y composición surge de los primeros estudios hechos por Merwin⁴ pues él reporta una excepcional estabilidad del color frente al ácido nítrico y a altas temperaturas, resultados que Gettens² corrobora posteriormente, iniciando así una serie de investigaciones que ayudarían a resolver parte del problema.

1.1 LOCALIZACIÓN

Al principio¹⁵ se creyó que el Azul Maya existía sólo en la zona maya de Yucatán, sin embargo se han encontrado piezas y murales en zonas aledañas como: Tajín en Veracruz, Bonampak en Chiapas, Cozumel, Oaxaca, Valle de México, Palenque, Piedras Negras, Seibal, Tikal, Guatemala, Belice y Cacaxtla en Tlaxcala. Mostrados en el mapa^{7,16}. (Figura 1)

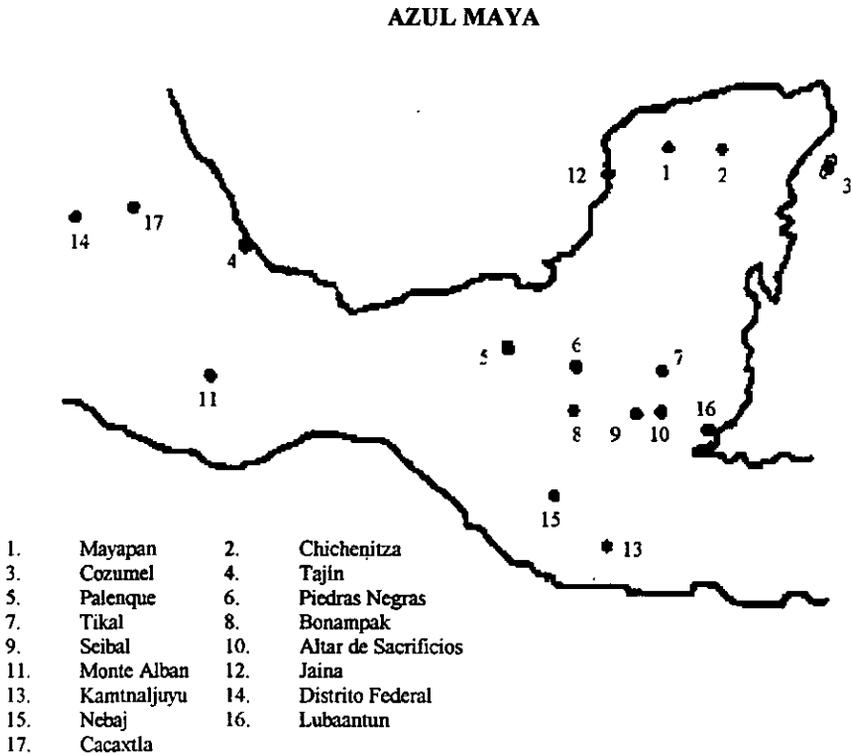


Figura 1. Localización del Azul Maya

L2 INVESTIGACIÓN CRONOLÓGICA

1962. Gettens, R.J. "Maya Blue: An unsolved problem in ancient pigments"

Gettens² estudia las propiedades del Azul Maya y confirma lo dicho por Merwin⁴ que el color azul no es destruido por ácido nítrico caliente y tampoco es afectado por el calor, también logra identificar uno de sus componentes: la paligorskita.

En esta investigación incluye el estudio de otro pigmento llamado Azul de Tekax ya que se encontraron características similares al Azul Maya.

Aí comparar el patrón de difracción del Azul Maya con otras muestras de arcilla identifica la base mineral del pigmento tratándose de una arcilla blanca llamada paligorskita, dicha arcilla tiene una estructura tubular, su fórmula ideal es $(\text{OH}_2)_4(\text{OH}_2)_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{20} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (establecida por Bradley en 1940) donde algunos átomos de magnesio pueden ser sustituidos por átomos de aluminio.

Aún habiendo identificado la base mineral del Azul Maya queda abierta la pregunta ¿por qué es azul el Azul Maya? ya que no logró identificar el pigmento que da el color azul.

El Azul de Tekax fue recolectado en Chichén Itzá por A. Everett Austin en 1920 al que posteriormente se le hicieron estudios para conocer su composición y propiedades describiendo que era muy similar al Azul Maya, también se observó que este pigmento no era puro ni homogéneo y que uno de los componentes era un azul orgánico con propiedades del índigo. Haciendo un análisis espectrofotométrico encuentra una similitud en la composición química del Azul Maya, el Azul de Tekax y la paligorskita.

Hace pruebas con ácido nítrico, ácido clorhídrico concentrado, agua regia, ácido sulfúrico concentrado e hidróxido de sodio al 5% a temperatura ambiente durante 18 horas no observando ningún cambio en el color. Las mismas muestras se calentaron a 100° C por 30 minutos, nuevamente no hubo cambio en el color.

De ello concluye que el azul es parte de la base mineral y no que el pigmento está solo en la superficie. Basándose en estos resultados Gettens contempla la posibilidad de que el pigmento sea inorgánico.

Con el Azul de Tekax obtuvo resultados similares; en ácido nítrico concentrado caliente, ácido clorhídrico y agua regia hubo una disminución en la intensidad del color; con el hidróxido de sodio al 5% y ácido sulfúrico concentrado no hay cambio.

En este trabajo se identificó la paligorskita como componente de la pintura y se dieron a conocer las propiedades químicas del Azul Maya. De esta investigación quedaron abiertas las siguientes preguntas: ¿Cuáles son los componentes para producir el Azul Maya?, ¿Cuál es el proceso para elaborar la pintura? y el porque de su estabilidad.

1962. Shepard, A.D. and Gottlieb, H.B. "Maya Blue: alternative hypothesis"

Cuando Shepard⁵ estudia algunas muestras de Azul Maya (1958) originarias de Mayapán sugiere que el pigmento puede contener un colorante orgánico, basándose en dos propiedades: óptica y térmica. Otra prueba de ello, menciona es que la profundidad del color sea independiente del tamaño de las partículas, además menciona que algunas partículas no están coloreadas completamente sugiriendo una incompleta penetración del agente colorante.

Al calentar el Azul Maya se observa un cambio en el color; primero pasa de azul a gris y luego a blanco. Shepard sugiere, se debe a una reacción normal cuando un compuesto orgánico se quema. El carbono es liberado, después oxidado y termina como una sustancia gaseosa, por eso el color de la muestra es blanco al final.

Gottlieb intenta extraer el colorante azul del pigmento, para ello utiliza un solvente orgánico (tetrametil sulfona caliente) sin embargo después de 3 semanas no obtiene nada.

Otra idea de Gottlieb los llevó a medir el espectro de reflectancia para identificar el color midiéndole porcentaje de luz reflejada por el Azul Maya a diferentes longitudes de onda. Al comparar este espectro con otros colores no se encontró ninguno con características semejantes.

Con espectroscopia infrarroja trataron de encontrar radicales orgánicos, sin identificar ninguno. Por medio de difracción de rayos X reportan otra arcilla en dos muestras de pigmento: la sepiolita que es isoestructural a la paligorskita.

En cuanto a las aportaciones, los autores creen que el colorante de la pintura sea un pigmento orgánico basándose en las propiedades ópticas y térmicas del Azul Maya, pero sin proponer alguno en especial. En este trabajo continúa la interrogante sobre el colorante y el proceso de elaboración de la pintura.

1966. Van Olphen, H. "Maya Blue: A clay organic pigment"

Van Olphen⁶ propone algunos métodos para obtener un pigmento con propiedades similares al Azul Maya elaborándolo a partir de soluciones de índigo y paligorskita.

El complejo azul lo elabora con acetato de indoxil y paligorskita simplemente mezclando los dos componentes luego una vez pintada la arcilla de azul se filtra y lava con agua, aparentemente la arcilla se torna azul por la oxidación del indoxil en la superficie. Como resultado éste pigmento azul no es estable a ácidos calientes y el color se extrae con acetona.

Utilizando la misma mezcla observó que al calentarla por varios días a temperaturas de 75° C o de 105° C a 150° C, el pigmento era estable a ácidos calientes y el color ya no podía ser extraído con acetona. El exceso de índigo en la mezcla puede ser extraído con acetona o ácido nítrico quedando después del lavado un contenido de índigo menor al 0.5 %, indicando que solo es absorbido en la superficie externa de las partículas de paligorskita y no por todos sus canales.

Describe dos métodos alternativos para preparar el complejo índigo-paligorskita:

- 1.- Mezcla índigo y paligorskita, calienta y remueve cualquier exceso de índigo lavando con acetona.
- 2.- Reduce índigo con una solución de hidrosulfito de sodio, pone en contacto paligorskita con la solución y se expone al aire. Después se calienta para que se mantenga estable a los ácidos.

Con alguno de estos métodos se puede preparar un pigmento similar al Azul Maya, sin embargo el índigo natural contiene impurezas y por lo tanto es diferente al índigo sintético así que, al intentar preparar esta mezcla con el índigo natural es posible que no se obtengan los mismos resultados. Utilizando sepiolita e índigo se puede obtener un pigmento parecido al Azul Maya, no sucediendo lo mismo con arcillas como: caolinita, nontronita Wyoming, bentonita y mordenita. Al parecer la estructura es importante para lograr la estabilidad.

Van Olphen es el primero que dice haber obtenido un pigmento sintético con propiedades químicas parecidas al Azul Maya, y ha sido desde entonces la base para todos los estudios posteriores de esta pintura. Él dice que el índigo es el pigmento que satisface casi todas las interrogantes hechas al principio del estudio del Azul Maya, aunque menciona que los tonos azul-verde quedan aún sin explicarse, y además que no le es posible precisar las condiciones de calentamiento que dan origen a la estabilidad química.

1967. Kleber, R.L. et. al. "Etude et Identification du Blue Maya"

Kleber³ acepta la teoría que el causante del color azul sea un compuesto orgánico inclinándose por el índigo.

Para extraer el índigo del Azul Maya hacen una serie de pruebas con ácido fórmico, cloroformo, metano y piridina sin obtener ningún resultado; otro tratamiento para demostrar la presencia de índigo es con zinc, hidróxido de sodio, hiposulfito de sodio y glucosa, igualmente sin obtener ningún resultado.

Al igual que Van Olphen⁶ prepararon varias mezclas de paligorskita e indigo con el fin de demostrar que si se puede obtener un complejo estable.

Las mezclas se elaboran con diferentes concentraciones del: 0.5 al 15 % de indigo y después dándoles un tratamiento de 5 horas a 190° C obteniendo que todas ellas son estables a ácido nítrico caliente.

Con las mezclas de indigo y paligorskita intentan detectar el colorante, sin embargo cuando la concentración de indigo es menor al 5% sus líneas típicas son enmascaradas por la arcilla evitando identificarlo.

Por otra parte analizan muestras de Azul Maya originarias de Tlatelolco, Jaina, Bonampak, de las regiones Tolteca, Mixteca y Azteca utilizando difracción de rayos X, identificando únicamente paligorskita. De la muestra de Jaina encuentran dos líneas que pueden corresponder al indigo, mientras que en la muestra de Tlatelolco solo aparece una línea. También se detectan: cuarzo, yeso y calcita. Por medio de la espectroscopia de absorción infrarroja tratan de encontrar indigo en las muestras de Azul Maya pero no obtienen ningún resultado. Cuando comparan las curvas espectroscópicas de absorción del Azul Maya con la mezcla artificial de paligorskita e indigo al 2.3% observan que son muy semejantes, demostrando que el pigmento se puede preparar de manera sintética.

Finalmente Kleber y sus colaboradores sugieren que el indigo se fija en la paligorskita cuando pierde su agua zeolítica (entre 150° C y 200° C) indicando que la molécula de indigo entra en la estructura de la arcilla.

Kleber elabora una pintura con indigo sintético y paligorskita comparándola con los resultados de espectroscopia obtenidos de la pintura original, sin embargo dice que sus resultados no son suficientes para comprobar plenamente que el indigo es el colorante del Azul Maya; menciona además que el método que utilizó no es el mismo que se empleo durante la época prehispánica.

1969. Cabrera Garrido, J. Ma. " El Azul Maya"

Cabrera¹ hace un estudio en muestras de Azul Maya concluyendo que esta pintura es un complejo de paligorskita y índigo natural estabilizado por la acción del calor y propone un esquema analítico para identificar los componentes de este pigmento.

Hace análisis a tres muestras que no fueron utilizadas para pintar; la primera es una bolita que se sacó del fondo del Senote Sagrado de Chichén Itzá, la segunda unas cuentas de collar de procedencia desconocida y la tercera una porción de pigmento encontrada en Tlatelolco. A las muestras se le hicieron pruebas químicas con ácidos minerales concentrados y en frío (nitríco y clorhídrico) observando un ataque parcial del pigmento, ya que algunos granos se decoloran o pasan a verdes, los hidróxidos alcalinos diluidos, el amoniaco, ácido fórmico, ácido acético, hidrosulfito de sodio, sosa cáustica diluida y ácido sulfúrico con zinc metálico no le afectan, manteniendo el color azul. En el análisis térmico observa una pérdida del color azul a los 248° C y 301° C temperatura donde ocurre una transformación endotérmica, a los 544° C el pigmento cambia a gris y calcinándolo a alta temperatura en un tubo cerrado se vuelve de amarillo-oscuro a rojo-oscuro.

Utilizando el esquema analítico, Cabrera dice aislar e identificar completamente el índigo en todas las muestras de Azul Maya. Como se describe a continuación.

- La muestra se trata con ácido clorhídrico concentrado (durante varias horas). Centrifuga y filtra.
- El pigmento azul extraído se lava con varias porciones diferentes de alcohol etílico. Centrifuga y filtra.
- Nuevamente el pigmento azul se trata con cloroformo ligeramente caliente durante 48 horas o más. Centrifuga y filtra. Se obtiene además del pigmento una solución azul.
- El pigmento azul se caracteriza por difracción de rayos X y por microscopía electrónica, encontrando paligorskita.
- De la solución azul se identifica el índigo por espectroscopia de absorción NMR.

Con este trabajo Cabrera cree resolver el problema del Azul Maya al identificar por completo sus componentes y al proponer el método para hacerlo.

Cabrera dice separar e identificar plenamente el colorante del Azul Maya contestando la pregunta original sobre el colorante que da el color a la pintura: Lo identifica con el índigo. En cuanto a la estabilidad química no menciona haber encontrado su origen, ni el método de elaboración de la pintura, dejando abiertas éstas dos interrogantes.

1971. Shepard, A.D. and Pollock, H.E. "Maya Blue: an updated record"

Shepard y Pollock⁷ publican un estudio muy completo del Azul Maya. Comienzan localizando depósitos naturales de paligorskita en la península de Yucatán con el fin de encontrar alguna relación con la pintura. Analizan las arcillas de varias villas e identifican casi siempre montmorilonita, kaolinita y paligorskita, también mencionan que la paligorskita aun se usa para fabricar vasijas como desgrasante.

Refiriéndose al Azul Maya sospecha que la tonalidad del pigmento varía con la cantidad de carbonato de calcio y que el verde es una mezcla de un pigmento amarillo con Azul Maya.

Pollock hace un estudio completo de colorantes azules prehispánicos, basándose en los libros de Sahagún¹¹ y Hernández¹², describe los colorantes orgánicos y minerales, entre ellos están: el *texotli*, el *tlaceuilli* o piedra de índigo natural, el *matlalli* y el *mouitli*. De todos los colorantes escogen el índigo y dan una descripción de su preparación a partir de la planta *Indigofera sp.* Finalmente mencionan que la identificación del índigo en el Azul Maya sigue aún sin realizarse (como lo presume Cabrera¹), así como el proceso para elaborar la pintura.

1982. Littman, E.R. "Maya Blue- Further perspectives and the possible use of indigo as the colorant"

Littman⁸ también supone que el indigo es uno de los componentes del Azul Maya, haciendo varias pinturas sintéticas y naturales con el fin de probarlo.

Elabora pinturas con indigo sintético e indigo natural con paligorskita en diferentes concentraciones. Todas ellas son calentadas a 65°C y lavadas con ácido nítrico al 5% obteniendo un pigmento azul parecido al Azul Maya. Posteriormente las muestras se caracterizan por difracción de rayos X, sin encontrar ningún rastro de indigo debido a la baja concentración.

En éste trabajo se deja nuevamente sin comprobar que el indigo sea el colorante del Azul Maya así como el método de elaboración y la estabilidad de la pintura.

1996. Yacamán, et. al. "Maya Blue paint: An ancient nanostructured material"

Recientemente Yacamán⁹ hace estudios a muestras originales de Azul Maya utilizando fluorescencia de rayos X, microscopía de transmisión electrónica de alta resolución, espectroscopia electrónica de pérdida de energía. De su estudio propone que el color del Azul Maya se debe a la presencia de nanopartículas de hierro y de óxido de hierro en una matriz de silica, y a la incorporación de moléculas de indigo en la estructura de la paligorskita, lo segundo, sin embargo no lo demuestra. Por lo tanto la respuesta sobre la composición del Azul Maya y del proceso de su elaboración sigue sin darse.

Capítulo II

DESARROLLO EXPERIMENTAL

La difracción de rayos X (DRX), el análisis termogravimétrico (TGA) y la espectroscopia de absorción en el visible para muestras sólidas por reflectancia difusa son las técnicas que se utilizaron para caracterizar las muestras. También se analizó la estabilidad química de una muestra de Azul Maya original, y de las pinturas elaboradas por nosotros, haciendo al final una comparación.

II.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Mediante difracción de rayos X se analiza la estructura cristalina de los materiales. Es importante remarcar que cada estructura cristalina produce un patrón de difracción único, lo que la hace identificable unívocamente.

Los rayos X se originan por la interacción de los electrones suficientemente acelerados con la materia. Estos rayos son ondas electromagnéticas con una longitud de onda que oscila entre 0.05 y 0.25 nm. Para producir rayos X para experimentos de difracción es necesario un voltaje de decenas de kilo volts que se suministra entre un cátodo y un metal anódico, ambos mantenidos en vacío. Debido a la diferencia de voltaje entre el ánodo y el cátodo los electrones se aceleran a través del vacío y cuando éstos golpean la lámina de metal se emiten rayos X con la longitud de onda característica del ánodo.

La muestra cristalina difracta los rayos X de acuerdo a la Ley de Bragg

$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda$$

En donde n representa el orden de difracción, λ es la longitud de onda del haz de rayos X, θ es el ángulo de difracción y d_{hkl} la distancia entre los planos atómicos de la red cristalina con índices de Miller hkl . (Figura 2)

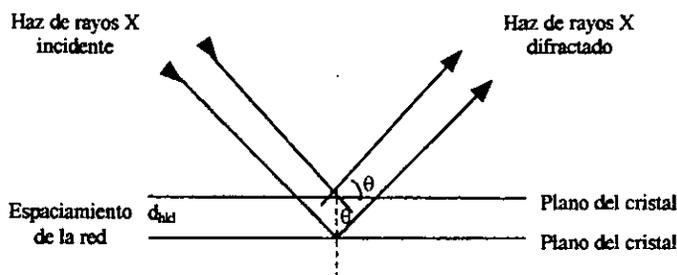


Figura 2. Difracción de rayos X

La difracción de rayos X por los planos de un cristal produce una radiación virtualmente monocromática. Un cristal al considerarse como una agrupación ordenada y periódica de átomos, pueden ser alcanzados por un haz de rayos X y difractarlos simultáneamente. Por lo general, las ondas generadas interfieren unas con otras anulándose, pero en ciertas direcciones se refuerzan para poder formar un nuevo frente de onda^{17, 18, 19}.

En este trabajo se empleó el método de difracción de polvos: La muestra se pulveriza para tener muchos cristales pequeños de manera que al ser expuestos al haz de rayos X están disponibles todas las orientaciones posibles.

En el método de polvos, la muestra por analizar se muele finamente, se coloca en un porta muestras compactándola de manera que forme un pequeño disco plano y sobre ella se hace incidir el haz monocromático de rayos X. Todas las muestras se caracterizaron por este método. El difractor utilizado fue un Bruker D8-Advance en configuración θ - θ .

II.2 ANÁLISIS TERMOGRAVIMETRICO

El Análisis Térmico abarca una serie de técnicas en las cuales, algún parámetro físico del sistema es medido de manera continua en función de la temperatura, mientras es sometido a una variación controlada de temperatura.

El TGA es una técnica en la cual el peso de una muestra se mide continuamente en función de la temperatura, mientras la muestra está sometida a un programa controlado de calentamiento o enfriamiento¹⁷. (Figura 3)

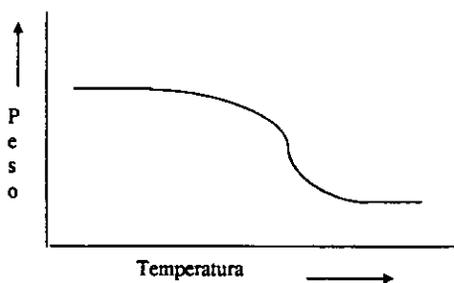


Figura 3. Curva TGA

La instrumentación utilizada en el análisis termogravimétrico consta de una microbalanza, un horno controlado por un programador de temperatura y los dispositivos de registro correspondientes. Las muestras fueron analizadas desde temperatura ambiente hasta 1000°C con un equipo Dupont 2000 a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmósfera de aire.

II.3 ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN

Se empleó luz con longitud de onda que va desde el ultravioleta hasta el infrarrojo. El rango espectral para el UV es de 200-380 nm, para el VIS es de 380-780 nm y para el IR es de 780-1200 nm ¹⁷. En éste trabajo se hacen mediciones espectroscópicas de absorción para muestras sólidas (reflectancia difusa), midiendo únicamente en la región Visible porque es ahí donde se observa el color. Las mediciones se realizaron en un Espectrofotómetro UV-160V marca SHIMADZU, con un aditamento Reflectance Spectroscopy DRS-800 para medir el espectro de reflectancia difusa

Espectroscopia de Reflectancia Difusa

En la medición de muestras en polvo disperso el método de tableta de bromuro de potasio (KBr) es frecuentemente usado. La muestra en polvo es mezclada con polvo de KBr molida y comprimida, que es entonces medido por el método de transmisión y convertido posteriormente a absorción, como se muestra en la figura 4. Cuando el haz de luz incide en una muestra en polvo, alguna parte de la luz es reflejada especularmente por la superficie del polvo y la otra parte penetra en la muestra y es transmitida y reflejada repetidamente y entonces, emerge hacia fuera de la muestra como luz reflejada difusa (dispersa). Esa luz reflejada difusa forma el espectro de absorción de la muestra en polvo ¹⁸.

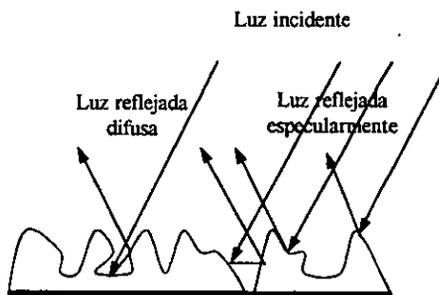


Figura 4. Superficie de la muestra en polvo

II.4 ESTABILIDAD QUÍMICA

Esta prueba tiene como fin conocer las propiedades de la pintura original frente a diferentes agentes químicos. Lo que servirá como referencia de comparación cuando se elaboren nuestras propuestas de pinturas de Azul Maya.

Ocho pequeñas porciones de Azul Maya se ponen (cada una por separado) en un tubo de ensayo, al cual se le agregan 2ml de uno de los siguiente reactivos:

- Tubo 1: Agua (H_2O)
- Tubo 2: Cloroformo ($CHCl_3$)
- Tubo 3: Sosa 5% ($NaOH$)
- Tubo 4: Amoniaco (NH_4OH)
- Tubo 5: Acetona ($(CH_3)_2CO$)
- Tubo 6: Ácido Nítrico concentrado (HNO_3)
- Tubo 7: Ácido Clorhídrico concentrado (HCl)
- Tubo 8: Ácido Sulfúrico concentrado (H_2SO_4)

Los tubos permanecen cerrados para evitar la pérdida de reactivo, y se observaron cada 24 horas durante un total de 30 días.

Con las pinturas elaboradas por nosotros a partir de *tlaceuilli* y *sacuum* (AP10) se hace el mismo experimento haciendo series de 8 tubos de ensayo colocando 100 mg de muestra y añadiendo 2 ml de los mismos reactivos que se utilizaron para el Azul Maya, comparando los resultados con los obtenidos de la muestra de Azul Maya original.

Capítulo III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En éste capítulo se presentan los resultados de la investigación histórica y experimental realizada en el presente trabajo, iniciando con el estudio a una muestra original de Azul Maya, continuando con las materias primas empleadas para elaborar pinturas azules similares al Azul Maya, utilizando: *sacuum* como base de la pintura; *tlaceuilli* y *matlalli* como colorantes; *tequícquitl*, *tlalsócoll*, *tenextli* como modificadores de tono; *axin* y aceite de *chia* como recubrimientos. Finalmente se comparan los resultados de éstas pinturas con los obtenidos de la pintura original.

III. 1 PINTURA ORIGINAL DE AZUL MAYA

Se obtuvo una muestra original de Azul Maya proveniente de Cacaxtla, a la que se le asigna la clasificación CCX70. A simple vista la muestra está formada de tres capas: la primera es una capa gruesa de color gris formada por el estuco, el cual no juega un papel alguno en la identificación de la pintura azul. La segunda capa es de carbonato de calcio (identificada por difracción de rayos X) y la tercera es una capa muy delgada de pintura azul en dos tonos, uno azul claro y otro azul oscuro.

Para su análisis, la muestra se divide en dos partes, una funciona como referencia y otra se utilizó para hacer las pruebas de estabilidad y caracterización.

Difracción de rayos X

En la muestra de Azul Maya, CCX70, se observa únicamente *sacluum* y carbonato de calcio, sin encontrarse ninguna línea que corresponda a algún colorante u otro compuesto. (Figura 5) Estos resultados coinciden totalmente con lo reportado en la literatura¹⁻⁵.

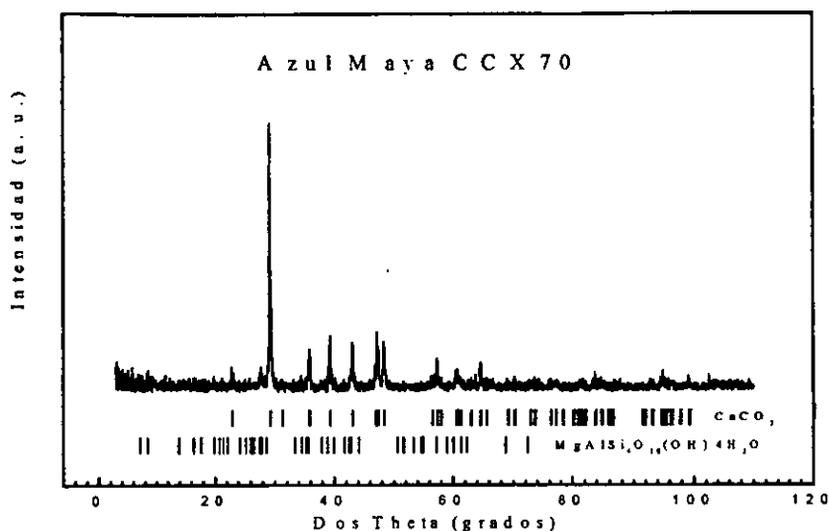


Figura 5

Espectroscopia de Absorción

Tanto en la parte clara como en la oscura de la muestra de Azul Maya, se observa un máximo de absorción λ_{max} en 681nm (Figura 6). Las curvas de absorción son iguales lo que sugiere que es la misma pintura pero con diferente disolución. Dado que en la literatura no han sido reportados estos espectros para el Azul Maya, nos es imposible hacer comparación alguna.

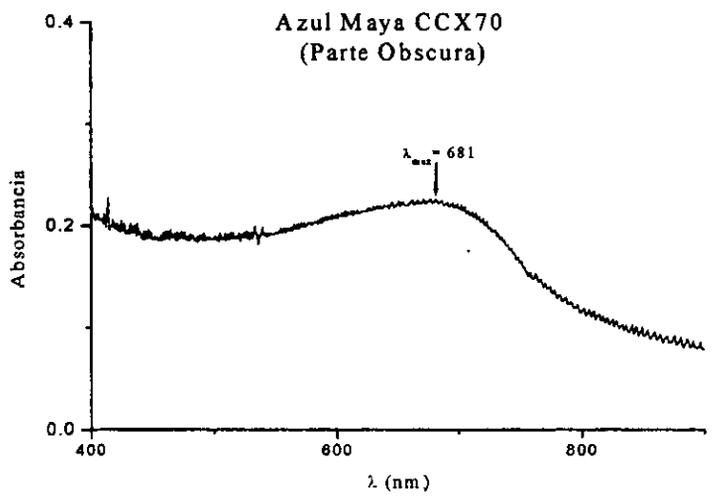
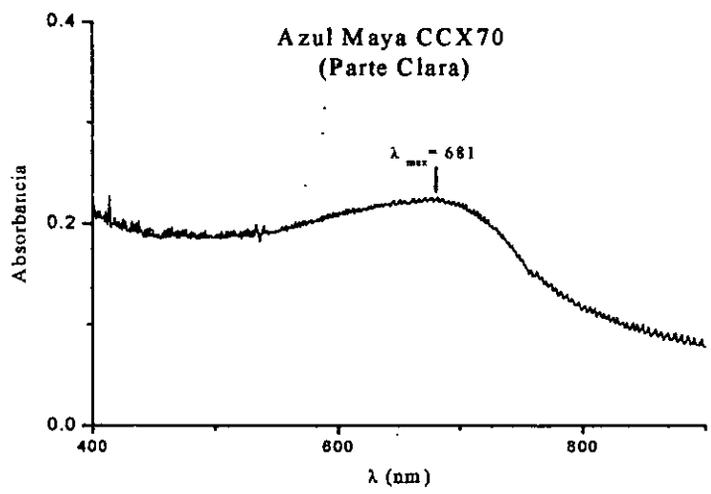


Figura 6

Estabilidad química

Como ya se mencionó ésta prueba tiene como fin conocer las propiedades de la pintura original frente a diferentes agentes químicos.

Después de poner en contacto al Azul Maya con los diferentes disolventes, no se observó cambio alguno a simple vista en la pintura, únicamente se observa a partir del segundo día que la solución en el tubo ácido sulfúrico toma un color amarillo tenue que permanece hasta el final de la prueba. Estos resultados coinciden con algunos reportados por otros autores ^{1, 2, 4, 5}. La comparación entre estos resultados y nuestra pintura se muestran más adelante.

Transformación por tratamiento térmico

Esta prueba se hizo con el fin de observar los cambios de color en la pintura al aumentar la temperatura. La muestra fue calentada en aire desde la temperatura ambiente, 21°C, hasta 550°C. Se observan dos cambios importantes: el primero ocurre a 350°C, la muestra se transforma del color azul a un color gris. El segundo cambio ocurre a 430°C, la muestra pasa de ser gris a ser incolora. Estas transformaciones observadas coinciden con las reportadas en la literatura ^{1, 5}.

Sumario

Las contribuciones del presente trabajo relativas a la caracterización de la muestra original de Azul Maya son las siguientes: El espectro de absorción del Azul Maya, está centrado en una longitud de onda de 681 nm. Se observa que dos tonos diferentes de azul corresponden sólo a diferentes disoluciones de una misma pintura y no a otro colorante.

Se corroboran los resultados obtenidos por Cabrera¹, Gettens², Kleber³ y Shepard⁵ en cuanto a las propiedades de la pintura y a su comportamiento cuando se le da tratamiento térmico. Pero, contrastan con lo reportado por Cabrera en lo referente a la completa separación del colorante de la pintura como él lo menciona en su trabajo.

III.2 SACLUM

Como arriba se observó, en la pintura original aparece la arcilla *sacuum* (paligorskita), siendo la base para elaborar la pintura, en esta parte se caracteriza el material y se describe su estructura y propiedades.

El *sacuum* corresponde al mineral paligorskita, mismo que fue reportado en la península de Yucatán a inicios del siglo XX^{20, 21}, aunque debe aclararse que en los textos del siglo XVI¹⁰ mencionan su uso como barniz de piezas cerámicas. Para el presente trabajo se obtuvieron muestras de *sacuum* de la minas comunales de Tikul, Yucatán²². Esta tierra es empleada por los alfareros de la región para darle plasticidad a las arcillas que emplean en la fabricación de la cerámica local. Una segunda muestra de este mineral se obtuvo a flor de tierra en las cercanías del pueblo de Tepakán, Municipio de Calkiní en Campeche, en donde se le conoce con el nombre de *Castún* y se emplea para proteger los candeleros que se usan en las festividades del día de muertos²³; un uso muy similar al descrito en Calepino de Motul¹⁰ que es un documento del siglo XVI. Por su pureza, para el presente trabajo se utilizó el *sacuum* de Campeche para todos los experimentos.

El *sacuum*.- es una arcilla, blanca, esta compuesta de laminillas muy delgadas, las cuales se separan fácilmente cuando está húmeda, pero difícil de separar cuando se encuentra seca porque es muy dura. Su peculiar estructura le confiere una serie de propiedades, entre ellas la de formar suspensiones poco afectadas por la concentración iónica y una enorme capacidad sorcitiva, por lo que es un poderoso decolorante y absorbente. También es capaz de formar geles y suspensiones estables de alta viscosidad a bajas concentraciones de sólido^{24, 25}. Los modelos que han sido propuestos para esta arcilla^{25, 26} la describen como una estructura 2:1, porosa (Figura 7 y 8) con canales en donde se ocluye el agua cuando se humedece.

Generalizando la fórmula de la paligorskita es: $(R^{2+}, R^{3+})_5 (Si, R^{3+})_8 O_{20} (OH)_4 (H_2O)_4$ donde: $R^{2+} = Mg$ ó Fe^{2+} y $R^{3+} = Al$ ó Fe^{3+} . En algunos casos suelen encontrarse Al, Fe y Mg dentro de la misma paligorskita.

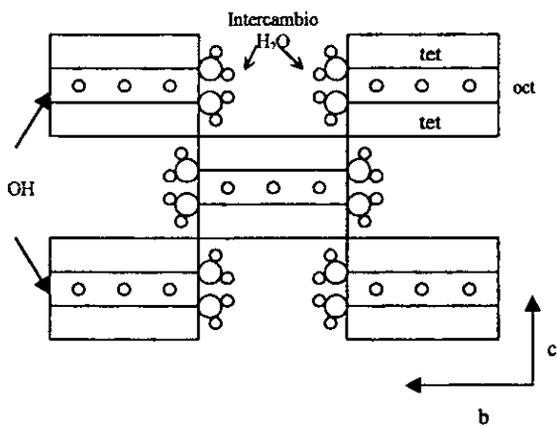


Figura 7

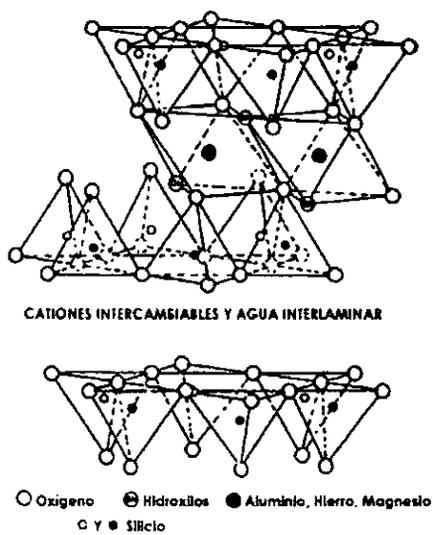


Figura 8

Difracción de rayos X

Los patrones de difracción del *sacuum* de Campeche se muestran en la tabla 1, comparándose con algunos datos reportados. En la figura 9 se muestra el difractograma.

Tabla 1

hkl	Este trabajo d_{hkl} (Å) Campeche	P. Galan ²¹ d_{hkl} (Å) Yucatán	Velde, B. ²⁵ d_{hkl} (Å)	Gettens ² d_{hkl} (Å)
011	10.39	10.36	10.4	10.5
002	6.32	6.36	6.4	6.44
031	5.36	5.34	5.4	5.42
040	4.43	4.441	4.5	4.49
121	4.22	4.247	4.3	4.18
013	4.13	4.131	4.2	
122	3.63	3.656	3.67	3.69
132	3.30	3.366	3.35	3.50
004	3.18	3.18	3.18	3.23
123	3.07	3.124	3.10	3.03
044	2.56	2.59		2.61
211	2.52	2.44		2.55

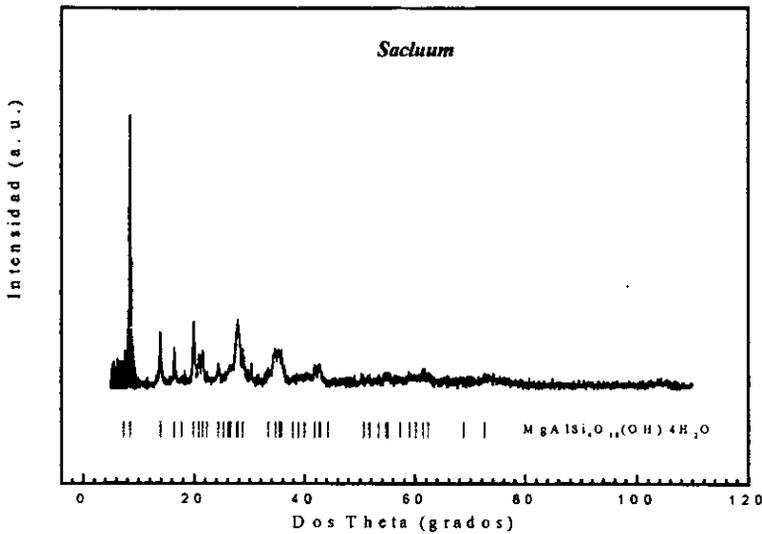


Figura 9

Análisis termogravimétrico

Del análisis térmico gravimétrico obtuvimos los siguientes resultados:

El 5% de la masa perdida ocurre entre la temperatura ambiente y los primeros 200°C, en ésta región se mantiene estable y es en ella donde trabajamos; entre los 200°C y los 350°C la pérdida de masa es de un poco mas de 45% y de los 350 a los 1000°C se pierde mas de 8%. (Figura 10)

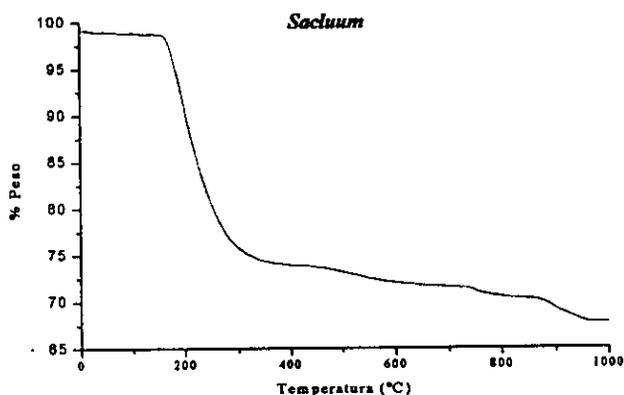


Figura 10

Comparando nuestros resultados con los reportes de Velde²⁵ y Grim²⁷ tenemos los siguiente:

Tabla 2. TGA

<i>Sacluum</i>	Masa perdida (% peso)
Este trabajo	Hasta 200°C el 5%; entre 200 y 350°C el 45%; arriba de los 350°C el 8%.
Velde ²⁵	Entre 10 y 20°C el 10 %; entre 200 y 300°C del 2 al 4%; entre 500 y 600°C del 2 al 3%; y arriba de 600°C nada.
Grim ²⁷	Entre los primeros 200°C el 10%; entre 200 y 1000°C el 8%.

Espectroscopia de Absorción

El *sacuum* no absorbe en la región del visible como se observa en la Figura 11. Contrastando con lo observado en la muestra original de Azul Maya, donde se muestra un máximo de absorción en 681 nm.

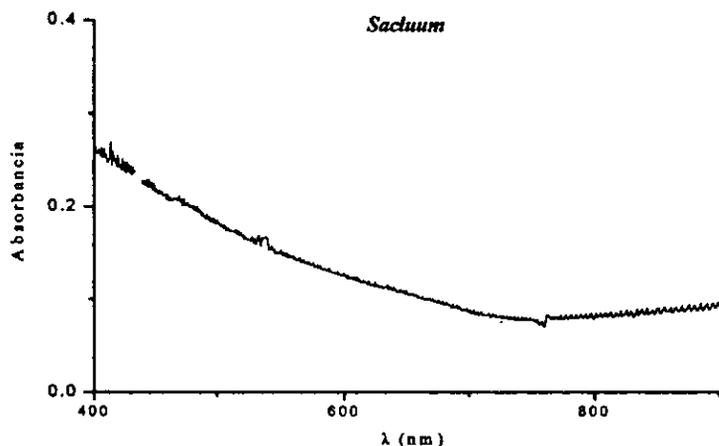


Figura 11

Sumario

Se identificó la paligorskita como *sacuum*, rescatando el nombre que se le daba durante la época prehispánica a esta arcilla.

Se ubicaron yacimientos de *sacuum* en la zona sur de la República Mexicana, por información proporcionada de los lugareños al Dr Bokhimi, quien extrajo algunas muestras para los experimentos de éste trabajo.

De la caracterización obtuvimos datos diferentes a los reportados por Velde²⁵ y Grim²⁷ en cuanto al TGA, pues la pérdida de masa es mayor que la que ellos reportan. El espectro de absorción demuestra que el *sacuum* y el Azul Maya son diferentes, porque ésta arcilla no absorbe en la región del visible mientras que la pintura original si tiene un máximo de absorción en 681 nm, lo que demuestra que la combinación del *sacuum* con algún colorante debe dar el Azul Maya y que la arcilla sola no tiene esas características.

III.3 EL COLOR AZUL EN EL MÉXICO PREHISPÁNICO

En las fuentes originales consultadas sobre los colores en el México prehispánico se describen cuatro colores azules, tres extraídos de plantas y uno de origen mineral. Como la parte mineral asociada al Azul Maya ha sido bien identificada (tal y como lo vimos en los párrafos anteriores) y como las propuestas para descifrar el Azul Maya buscan un componente orgánico asociado al *sacuum*, tomaremos como premisa para el presente trabajo, estudiar sólo los colores azules de origen vegetal: *tlaceuilli*, *matlalli* y *texotli*.

TLACEUILLI

Partiendo de las fuentes primarias de Sahagún¹¹ y Hernández¹², se identifica la planta empleada para producir este colorante. Se describe su localización actual en algunos puntos de la República Mexicana, se caracteriza el colorante, se describe el proceso de obtención, así como sus propiedades y comportamiento y el proceso para elaborar pintura a partir de *sacuum* y *tlaceuilli*.

Identificación

Sahagún⁴ describe el *tlaceuilli* como un colorante azul oscuro el cual se obtiene de una hierba llamada *xiuhquilitl*:

Fray B. Sahagún. Libro XI, Capítulo XI.

Tlauceuilli. Ay una yerba, en las tierras calientes que se llama xiuquilitl, majan esta yerba y exprimentla el zumo, y echan en unos vasos. Allí se seca o se cuaja: con este color se tiñe el azul oscuro, y resplandeciente: es color preciado.

Una planta con un nombre similar es descrita (inclusive da una imagen) por Hernández¹², *xiuhquilitl pitzáhoac*, de donde se obtiene un colorante azul llamado *tlacehoilli*. Hernández da una descripción más detallada de la planta y la identifica como añil natural tenuifolio.

Como la palabra náhuatl *pitzahuac* es un adjetivo que significa cosa delgada¹⁴, este adjetivo está describiendo el carácter tenuifolio de la planta, por lo cual consideramos que están hablando del mismo colorante.

Del *XIUHQUILITI PITZAHOAC*, o sea del añil tenuifolio o verdura herbáceo.

Hacen de ellas un colorante azul llamado por los indios tlacehoili o mohuitli y tiñen también de negro los cabellos...



Xiuhquiltlitzahuac

Figura 12

Hernández¹² describe otra planta llamada *xiuhquiltl patláhoac* o índigo natural latifolio de la que también se obtiene un color azul pero de menor calidad. La palabra náhuatl *patláhuac* significa cosa ancha¹⁴ lo que describe el carácter latifolio de la planta.

Del *XIUHQUILITLPATLAHOAC* o añil latifolio

Hay otra planta del mismo nombre que también tiñe de color azul y ennegrece los cabellos de las mujeres, pero distinta de la anterior en forma y tamaño. El modo de preparar el colorante es el mismo, pero el de esta planta es inferior, por lo que nada decimos acerca de su cultivo.

Durante la época de la colonia en México se estuvo exportando el añil hacia Europa en cantidades tan significativas que competían en ingresos con los obtenidos de la exportación minera. La planta de la que obtenían el añil la conocían como "xiquilité", que es un barbarismo castellano para designar la palabra náhuatl *xiuhquilitl*, de donde se obtenía el color azul. En sus estudios sobre la taxonomía de plantas americanas Mill le da al *xiuhquilitl* el nombre científico de *Indigofera suffruticosa*. De acuerdo a las descripciones de Mill y Hernández y al conocimiento que hemos adquirido de las dos indigoferas que más abundan en nuestro país, la *Indigofera suffruticosa* Mill corresponde al *xiuhquilitl pitzáhoac*. La *I. thibaudiana* DC es la segunda indigofera más abundante en México, de ella también se extrae índigo natural^{28, 29}, y por su descripción en Hernández corresponde al *xiuhquilitl patláhoac*.

Localización

Para este trabajo se localizaron y colectaron ambas especies de indigoferas (especies pertenecientes a la familia leguminosa) en los Estados de México y Morelos, en altitudes menores a los 1650 msnm. La *Indigofera suffruticosa* Mill (Figura 13) sólo se localizó en sitios húmedos en forma de arbusto de 1 a 2.5 metros de altura, hojas compuestas de 11 hojuelas de 1 a 3 cm de largo, flores pequeñas verdosas o amarillentas amariposadas, el fruto es una vaina de 1.2 a 5 cm encorvada^{30, 31}.



Figura 13. *Indigofera suffruticosa* Mill

Proceso para obtener *tlaceuilli*

Sahagún¹¹ y Hernández¹² además del colorante y la planta de donde se obtiene describen el proceso para obtenerlo, siendo éste la base para su producción actual.

Fray B. Sahagún¹¹. Libro XI, Capitulo XI.

...xiuquilitl, majan esta yerba y exprímela el zumo, y echan en unos vasos. Allí se seca o se cuaja...

Francisco Hernández¹². Tomo 2, pp. 112

...La manera de preparar el colorante que los mexicanos llaman mohuitli o tlaceuilli, es la siguiente: se echan las hojas despedazadas en un perol o caldera de agua hervida, pero ya quitada del fuego y tibia, o mejor(según afirman los peritos) fría y sin haber pasado por el fuego; se agitan fuertemente con una pala de madera, y se vacía poco a poco en el agua ya teñida en una vasija de barro o tinaja, dejando después que se derrame el líquido por unos agujeros que tiene a cierta altura, y que se asiente lo que salió de las hojas. Éste sedimento es el colorante; se seca al sol se cuele en una bolsa de cáñamo, se le da luego forma de ruedecillas que se endurecen poniéndolas en platos sobre las brazas y se guarda por último para usarse durante el año.

Proceso actual

1. Fermentación.- las plantas se cosechan por la mañana y se colocan en pilas llenándolas con agua hasta cubrirlas completamente, posteriormente se cubren con palos para evitar que la hierva suba. Esto con el fin de que se lleve a cabo la fermentación, el tiempo va de 12 a 15 horas. Al fermentarse el líquido hierve y se produce una espuma amarilla. Se cuele y se pasa a la pila de batir.
2. Oxidación.- ya en la pila de batir, con los batidores se agita fuertemente el líquido para apagar la espuma y lograr que penetre el aire con el fin de propiciar la oxidación. Cuando el líquido toma un color verde-azuloso, se bate hasta que se separa del granulado y la pasta flota en la superficie.
3. Filtrado y Secado.- posteriormente se deja reposar dos horas para que el tinte asiente, después se cuele en mantas y se seca al sol, quedando en forma de piedra^{28, 29}.

Química del *tlaceuilli* (indigo)

La planta de *xiuhquilitl* contiene un glucósido incoloro llamado indican que al macerar en agua se hidroliza liberando glucosa e indoxilo (Figura 14), este último se oxida al aire dando el *tlaceuilli* (indigo).

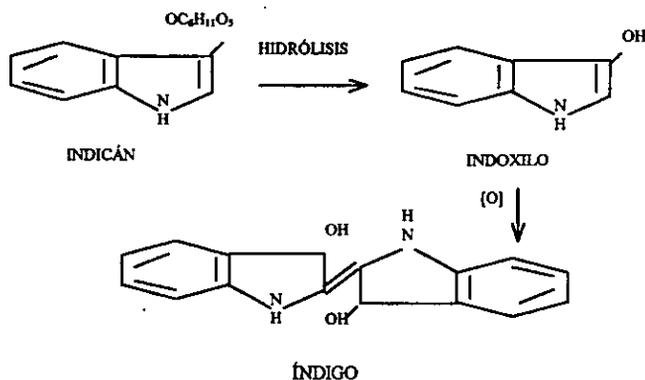


Figura 14. Proceso de reacción del indigo

En éste trabajo se utiliza *tlaceuilli* (indigo natural) originario de Oaxaca e indigo sintético fabricado por Aldrich.

Difracción de rayos X

Para el indigo sintético obtuvimos los siguientes datos de difracción. Tabla 3, obteniendo los mismos resultados para el *tlaceuilli* (indigo natural). En la figura 15 se muestran los difractogramas.

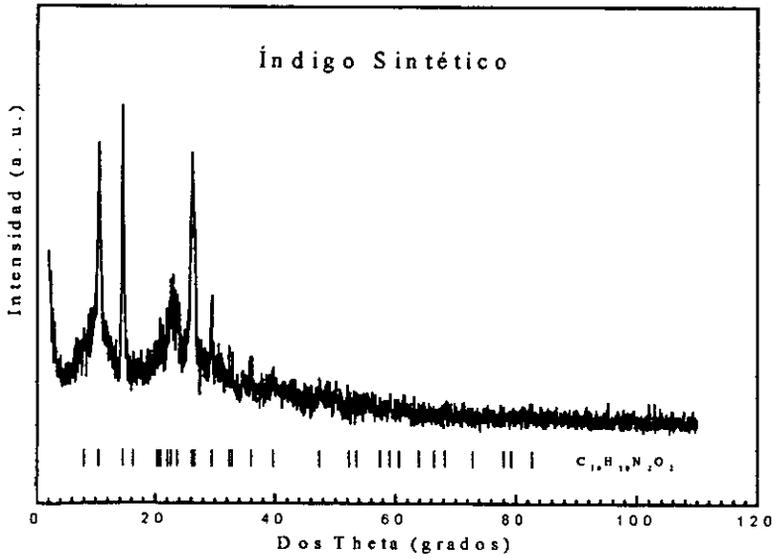
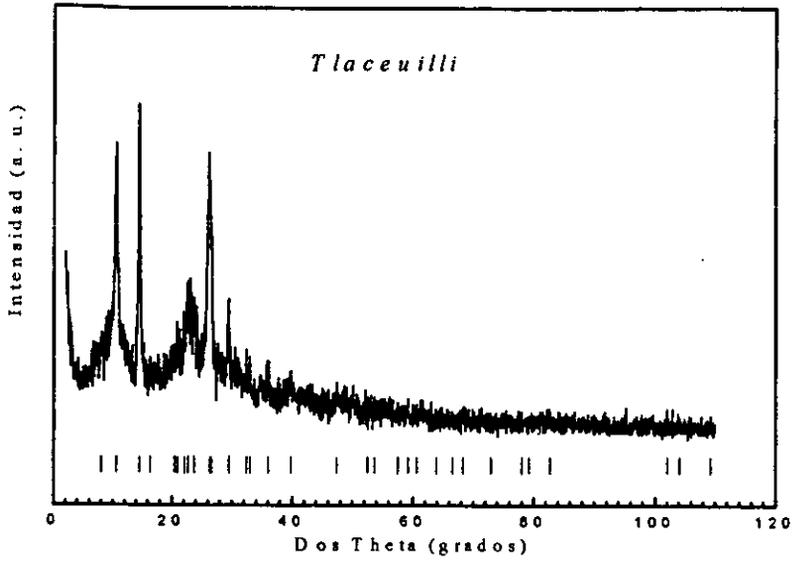


Figura 15

Tabla 3. Datos de difracción de rayos X para el indigo sintético.

2θ	d_{hkl} (Å)	hkl
10.5	8.41	011
13.2	6.732	002
17.5	5.336	110
22.5	3.94	211
24.5	3.63	012
26.5	3.54	212
28	3.18	202
35	2.63	204
42.5	2.18	104

Espectroscopia de Absorción

El *tlaceuilli* (indigo natural) presenta un máximo de absorción en 712 nm como se observa en la Figura 16.

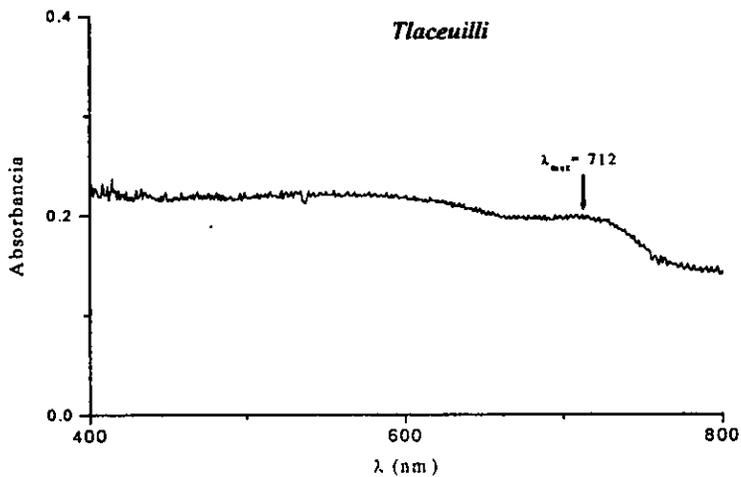


Figura 16

Partiendo de estos resultados se analizan los procesos para elaborar y caracterizar pinturas azules basadas en la mezcla de *sacuum* con *tlaceuilli*. Se analiza también la estabilidad de estas pinturas ante ácidos y se comparan con la muestra de Azul Maya original proveniente de un mural de Cacaxtla. Se comparan también sus patrones de difracción de rayos X y sus espectros de absorción en la región del visible.

Solubilidad del *tlaceuilli* e índigo sintético

Para conocer la solubilidad del *tlaceuilli* e índigo sintético se utilizaron los siguientes disolventes: ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido nítrico, ácido acético, acetona, alcohol etílico, cloroformo, agua destilada, solución de *tlaxócotl* y solución de *tequixquitl*. Las soluciones de *tlaxócotl* y *tequixquitl* se prepararon en concentración 1% en peso, usando como disolvente agua destilada.

Los colorantes se molieron en un mortero de ágata hasta obtener un polvo fino a fin de que tengan un mejor contacto con los disolventes. Se agregó un poco de índigo sintético a 11 tubos de ensayo, seguido de tres mililitros de disolvente, se agitaron observando si se disuelve o sedimenta. Para el *tlaceuilli* (índigo natural) se siguió el mismo procedimiento.

En la tabla 4 se muestran los resultados de ésta prueba, en ella observamos que los dos compuestos se comportan de la misma manera frente a los disolventes, sin embargo en algunos casos se obtienen colores diferentes, debido tal vez a las impurezas del *tlaceuilli*.

Procesos de elaboración de pinturas

La técnica para elaborar las pinturas azules es similar a la utilizada por Van Olphen⁶. Primero se mezcla la arcilla de *sacuum* con el colorante usando agua como dispersor y posteriormente se le da un tratamiento térmico. En todas las pinturas, el *sacuum* se molió en un mortero de ágata hasta obtener un polvo muy fino y luego se mezcló con los colorantes. Todas las comparaciones se hacen visualmente, posteriormente se comparan las muestras más sobresalientes mediante DRX y espectroscopia de absorción.

Proceso 1 (pintura sintética)

Esta pintura se elaboró a partir de índigo sintético y *sacuum* con el fin de encontrar la concentración adecuada de índigo para obtener tonos similares a los del Azul Maya.

Se hicieron mezclas de *sacuum* e índigo sintético con las siguientes concentraciones: 0.5, 1.0, 1.5, 3.0 y 6.0% en peso de índigo, usando como dispersante agua destilada, mezclando manualmente y secando al vacío, una vez secas comenzamos a descartar los azules muy oscuros y los muy claros, dejando el rango de concentración entre 1.5 y 3.0%. Posteriormente se prepararon otras muestras de 1.8 y 2.5% de índigo, obteniendo con ellas tonos cercanos al Azul Maya. Para cerrar más el rango se les dio tratamiento térmico y se hizo una comparación final. Las muestras fueron calentadas a 35°C, 50°C, 100 °C y 160°C durante 2 horas en un horno abierto al aire; se dejó enfriar en las mismas condiciones.

Después del tratamiento térmico se observó un cambio en el tono de ambas muestras, con 1.8% de índigo a 160°C se obtuvo un color parecido visualmente con algunas muestras de Azul Maya original, la muestra con 2.5% de índigo es atractiva pero el tono es más oscuro que el observado en todas las muestras de Azul Maya disponibles.

Proceso 2 (pintura natural)

Para la pintura con *tlaceuilli* y *sacuum* se utilizó la misma concentración que con el índigo sintético, empleando así la cantidad necesaria para terminar con los experimentos, puesto que solo se cuenta con 20 gramos de colorante natural.

Esta pintura se elaboró a partir de *sacuum* y *tlaceuilli* con una concentración de 1.8% en peso de *tlaceuilli* y se clasificó como AP10, siendo la base para los experimentos posteriores. El proceso de elaboración es similar al empleado para elaborar la pintura sintética, la diferencia, esta en una segunda molienda después de secar al vacío.

Para tener una muestra totalmente homogénea, parte de AP10 se muele nuevamente en un mortero de ágata hasta obtener un polvo muy fino posteriormente se calienta a diferentes temperaturas tomando como referencia la transformación del *sacluum*.

Las muestras son colocadas en un porta muestras de alumina e introducidas al horno para calentarlas a 100°C, 160°C, 200°C y 350°C durante 12 horas en aire, dejándolas enfriar hasta temperatura ambiente bajo las mismas condiciones. Las muestras son clasificadas como: AP10 fresca (muestra patrón), AP10A Ts 100°C, AP10B Ts 160°C; AP10C Ts 200°C, y AP10D Ts 350°C.

La muestra fresca (AP10) es de color parecido al sintético; al calentarla a 100°C (AP10A) da un tono azul cielo, el cual se oscurece al calentarla a 160°C (AP10B). Este color se transforma en un color gris al calentar la muestra a 200°C, que es la temperatura límite de estabilidad del *sacluum*. Finalmente, al calentar la muestra a 350°C este color gris se intensifica. Como a esta temperatura el *sacluum* se ha transformado totalmente, la transformación del color azul a gris al calentar la muestra debe ser producida por un inicio de la transformación de la arcilla, a lo cual la interacción de esta con el colorante es muy sensible.

Pintura sintética y natural. DRX

Los difractogramas de todas las pinturas muestran únicamente la presencia del *sacluum*, quien al parecer enmascara al índigo debido a su baja concentración. (Figura 17)

Pintura natural. TGA

Las muestras que se analizaron por termogravimetría fueron las que contenían 1.8% de *tlaceuilli* sin tratamiento térmico (AP10) y la calentada a 160°C (AP10B). En la Figura 18 observamos que las pinturas muestran un comportamiento diferente al *sacluum* puro, sin embargo presentan los mismos resultados en cuanto pérdida de peso, aún después del tratamiento térmico. Esto se debe probablemente a que las muestras de *sacluum* puras estaban secas.

Tabla 4. Solubilidad del *tlaceuilli* y del índigo sintético

Reactivo	<i>Tlaceuilli</i>		Índigo Sintético	
	Solubilidad	Observaciones	Solubilidad	Observaciones
Agua H ₂ O	-	El <i>tlaceuilli</i> queda disperso en el agua, después de unos minutos precipita.	-	El índigo queda disperso en el agua, después de unos minutos precipita
Alcohol Etilico CH ₃ CH ₂ OH	+	Solución azul tenue, lo demás precipita.	+	Solución azul tenue, lo demás precipita.
Acetona (CH ₃) ₂ CO	+	Solución azul tenue, lo demás precipita.	+	Solución azul tenue, lo demás precipita.
Cloroformo CHCl ₃	+	Solución azul tenue, lo demás precipita.	+	Solución azul tenue, lo demás precipita.
Ácido Acético CH ₃ COOH Conc.	-	El <i>tlaceuilli</i> queda disperso en el ácido, después de unos minutos precipita.	-	El índigo queda disperso en el ácido, después de unos minutos precipita.
Ácido Nítrico HNO ₃ conc.	+++	Solución amarilla claro	+++	Solución amarilla naranja
Ácido Clorhídrico HCl conc.	++	Solución azul claro, lo demás precipita	++	Solución azul claro, lo demás precipita.
Ácido Sulfúrico H ₂ SO ₄ conc.	+++	Solución azul oscuro	+++	Solución azul oscuro
<i>Tlalxócotl</i>	-	El <i>tlaceuilli</i> queda disperso en el agua, después de unos minutos precipita.	-	El índigo queda disperso en el agua, después de unos minutos precipita.
<i>Tequixquítl</i>	-	El <i>tlaceuilli</i> queda disperso en el agua, después de unos minutos precipita.	-	El índigo queda disperso en el agua, después de unos minutos precipita.

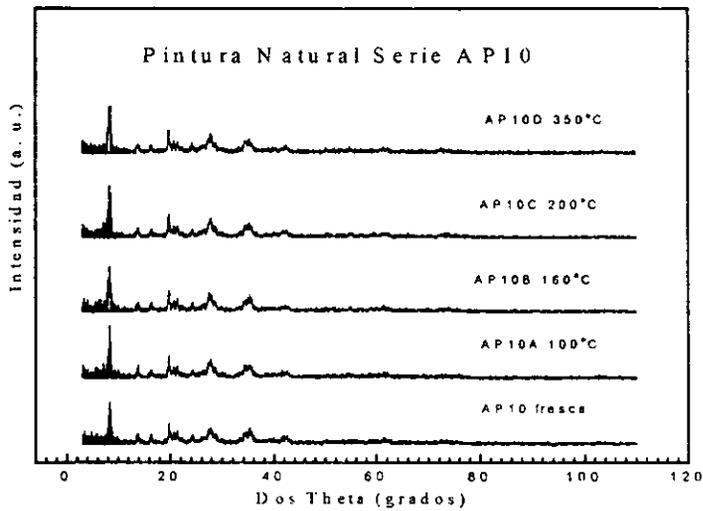
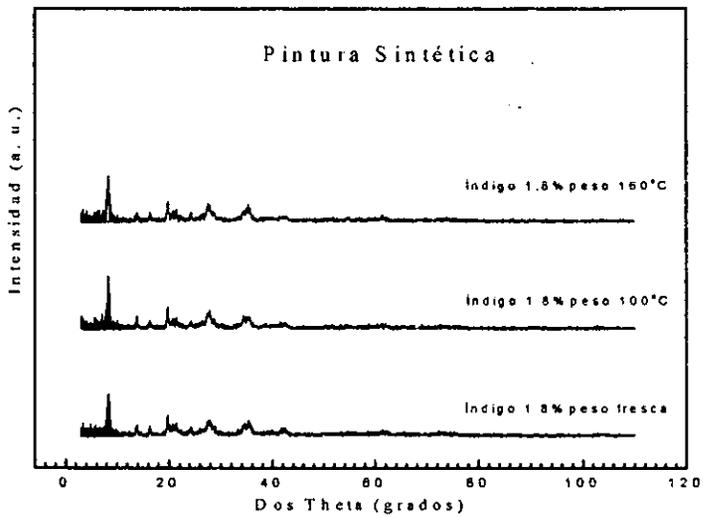


Figura 17

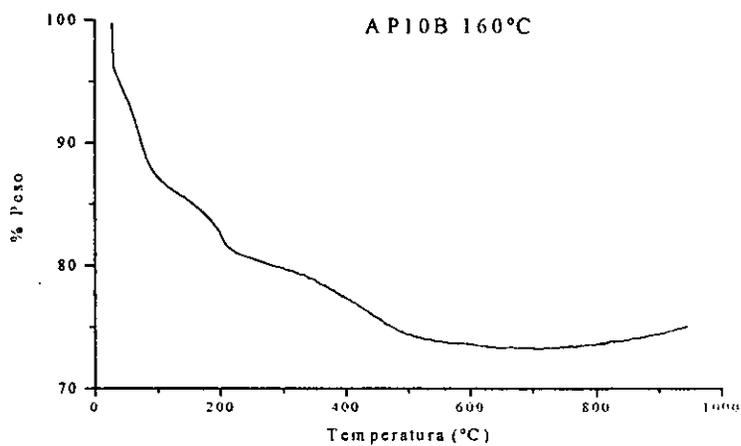
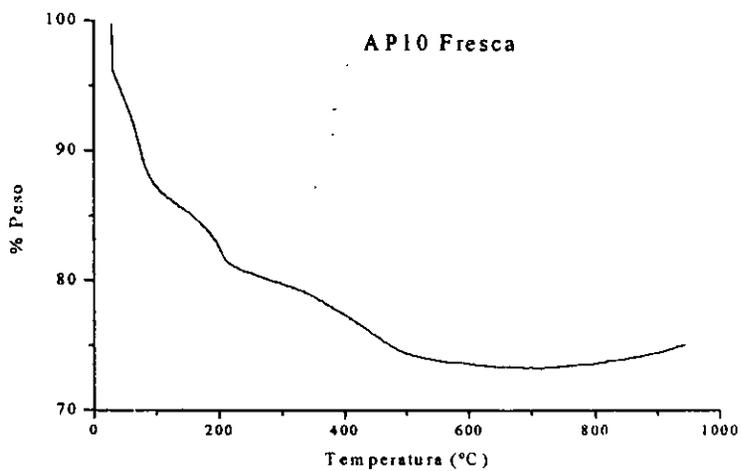


Figura 18

Espectroscopia de Absorción

La muestra fresca (AP10) y la calentada a 160°C tienen espectros de absorción iguales (Figura 19), el cual se caracteriza por tener un máximo en 681 nm al igual que la muestra original de Azul Maya (Figura 6), por lo que la mezcla *sacuum-tlaceuilli* es un fuerte candidato para reproducir el Azul Maya, sin embargo, como veremos no así por su estabilidad química ante los disolventes.

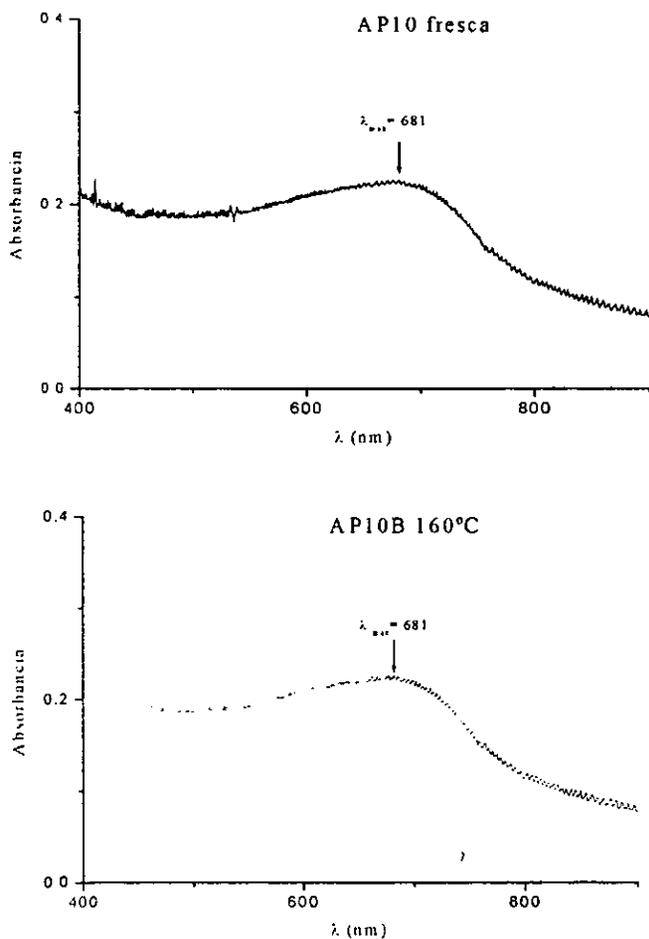


Figura 19

Estabilidad Química

Esta prueba tiene como objetivo comparar las propiedades químicas de las muestras AP10 con las propiedades de la pintura original de Azul Maya CCX70 frente a diferentes disolventes. Tiempo de contacto 30 días.

Como ya se mencionó los reactivos utilizados fueron:

- Tubo 1: Agua (H_2O)
- Tubo 2: Cloroformo ($CHCl_3$)
- Tubo 3: Sosa 5% ($NaOH$)
- Tubo 4: Amoniac (NH_4OH)
- Tubo 5: Acetona ($(CH_3)_2CO$)
- Tubo 6: Ácido Nitríco conc (HNO_3)
- Tubo 7: Ácido Clorhídrico conc. (HCl)
- Tubo 8: Ácido Sulfúrico conc. (H_2SO_4)

En la muestra de Azul Maya, como ya se mencionó, se observan cambios únicamente con ácido sulfúrico a partir del segundo día; presenta un color amarillo tenue, el cual se mantiene hasta el final de la prueba. Los cambios más notables de las pinturas AP10A, AP10B y AP10C se observan en los primeros 3 días y se muestran en las tablas 5, 6 y 7.

El grado de solubilidad se marca de la siguiente manera: + solubilidad mínima; ++solubilidad media, +++solubilidad casi total o total

Los cambios notables se presentan hasta el día 3, únicamente con ácidos, mostrándose en la tabla 7.

Tabla 5. Día 1

Muestra	Agua H ₂ O	Cloroformo CHCl ₃	Sosa al 5% NaOH	Amoniaco NH ₄ OH
AP10A Ts 100°C	+ azul muy tenue	++ azul tenue	++ verdoso	no hay cambio
AP10B Ts 160°C	+ azul muy tenue	++ azul tenue	++ verdoso	no hay cambio
AP10C Ts 200°C	no hay cambio	no hay cambio	+ verde muy claro	no hay cambio
Azul Maya CCX 70	no hay cambio	no hay cambio	no hay cambio	no hay cambio

Muestra	Acetona (CH ₃) ₂ CO	Ácido Clorhídrico HCl conc.	Ácido Nítrico HNO ₃ conc.	Ácido Sulfúrico H ₂ SO ₄ conc.
AP10A Ts 100°C	++ azul tenue	no hay cambio	no hay cambio	+++ azul oscuro
AP10B Ts 160°C	++ azul tenue	no hay cambio	no hay cambio	+++ azul oscuro
AP10C Ts 200°C	no hay cambio	+ amarillo verdoso muy tenue	+ ligeramente amarillo	++ azul grisáceo
Azul Maya CCX 70	no hay cambio	no hay cambio	no hay cambio	no hay cambio

Tabla 6. Día 2

Muestra	Agua H ₂ O	Cloroformo CHCl ₃	Sosa al 5% NaOH	Amoniaco NH ₄ OH
AP10A Ts 100°C	+ azul muy tenue	++ azul tenue	++ verdoso	no hay cambio
AP10B Ts 160°C	+ azul muy tenue	++ azul tenue	++ verdoso	no hay cambio
AP10C Ts 200°C	no hay cambio	no hay cambio	+ verde muy claro	no hay cambio
Azul Maya CCX 70	no hay cambio	no hay cambio	no hay cambio	no hay cambio

Muestra	Acetona (CH ₃) ₂ CO	Ácido Clorhídrico HCl conc.	Ácido Nítrico HNO ₃ conc.	Ácido Sulfúrico H ₂ SO ₄ conc.
AP10A Ts 100°C	++ azul tenue	+ amarillo tenue	no hay cambio	+++ azul oscuro
AP10B Ts 160°C	++ azul tenue	+ amarillo tenue	no hay cambio	+++ azul oscuro
AP10C Ts 200°C	no hay cambio	++ amarillo verdoso muy tenue	+ ligeramente amarillo	++ azul un poco oscuro
Azul Maya CCX 70	no hay cambio	no hay cambio	no hay cambio	+ amarillo tenue

Tabla 7. Día 3

Muestra	Ácido Clorhídrico HCl conc.	Ácido Nítrico HNO ₃ Conc.	Ácido Sulfúrico H ₂ SO ₄ conc.
AP10A Ts 100°C	+ amarillo verdoso tenue	+ amarillo tenue	+++ azul oscuro
AP10B Ts 160°C	+ amarillo verdoso tenue	+ amarillo tenue	+++ azul oscuro
AP10C Ts 200°C	++ amarillo verdoso muy tenue	+ ligeramente amarillo	++ azul un poco oscuro
Azul Maya CCX 70	no hay cambio	No hay cambio	+ amarillo tenue

Sumario

Se identificó y ubicó la planta de donde se extrae el *tlaceuilli*, caracterizándolo por difracción de rayos X y por espectroscopia de absorción en el visible y el ultravioleta por reflectancia difusa.

Se lograron elaborar pinturas a partir de *tlaceuilli* y *sacuum* con tonos similares al Azul Maya de Cacaxtla. Sus espectros de absorción son similares a los producidos por una pintura original de Azul Maya original, el cual tienen su máximo de absorción en 681 nm.

Sin embargo las pinturas preparadas en el presente trabajo no tuvieron la estabilidad química de la pintura original, lo que nos lleva a pensar que ésta contiene además del colorante y la arcilla un tercer elemento que protege la pintura, siendo éste un barniz u otro recubrimiento prehispánico que favorece a la estabilidad química de la misma.

Los tonos verdosos de algunas muestras de Azul Maya original no se pueden obtener con la mezcla de *tlaceuilli* y *sacuum*, creyendo que el tono verdoso lo da otro colorante.

MATLALLI

Como ya se dijo anteriormente el otro colorante azul que se menciona en las fuentes primarias es el *matlalli*. En el presente trabajo identificamos la planta de donde se extrae este color de acuerdo a los textos, se localizan lugares en donde la planta correspondiente crece en la actualidad; se analiza el proceso de extracción del colorante, y se hacen pruebas para conocer su comportamiento químico. Finalmente se busca encontrar un proceso para elaborar pinturas a partir del *sacuum* y del *matlalli*.

Identificación

Sahagún¹¹ (Figura 20) menciona que el *matlalli* se obtiene de unas flores azules sin mencionar el nombre de la planta.



¶ Al color azul fino llaman *Matlalli*, que quiere decir azul: este color se haze de flores azules, el color es muy preciado, y muy agradable de ver, llama se tambien Cardenillo, en la lengua es panóte.



Figura 20

Hernández¹² describe a la planta *matlalin*, que también se la describe con el nombre de *matlalitztic*, con la que se teñían de color verdemar o azul los textiles.

Matlalin

Es una hierba de dos codos de largo, raíces fibrosas, tallos cilíndricos y delgados, hojas delicadas, numerosas, y flores parecidas a violetas purpúreas y azules. Se remoja en agua por espacio de una hora, se exprime después y con ese líquido se tiñen las lanas, según dicen de color verde mar o azul. Lllaman algunos a esta yerba matlalxóchitl.

En otra parte del documento se muestra un dibujo del *matlalitztic* (Figura 21), el cual coincide con una de las especies de la familia commelinaceae, plantas que abundan en todo el país con más de 30 especies y variedades.



Matlalitztic
Figura 21

Martín de la Cruz y Juan Badiano¹³ describen la planta de *matlalxochitl* en el Códice de la Cruz-Badiano (Figura 22), la cual tiene las características descritas por Hernández¹² en el párrafo anterior. En cuanto al estilo del dibujo, éste es muy similar al encontrado en el documento de Sahagún, por lo tanto se asume hubo un error en el Códice Florentino al dibujar cuatro pétalos en la flor y no tres como se muestra en la siguiente figura.



Figura 22. Dibujo de *matlalxochitl* por Martín de la Cruz¹³ 1552

Para la identificación de la planta de donde se obtiene el *matlalli*, afortunadamente los nombres de *matlaxochitl*, *matlalitztic*, y cuatro corrupciones castellanas de la palabra náhuatl *matlalin* (matalín, mataliste, mataliz, y matalí) se conservan hoy en día, lo que permitió identificar fácilmente la planta. Esta es una *Commelina coelestis* de la familia commelinaceae.

De la *Commelina coelestis* se encontró que en nuestro país existen dos variedades, la *Commelina coelestis* Will (Figura 23) y la *Commelina coelestis* Bourgeau, por lo tanto se decidió ubicar y coleccionar las dos. Cada flor de la *Commelina coelestis* contiene: 3 pétalos azules, los racimos contienen de 4 a 10 flores. La diferencia entre la variedad Will y la Bourgeau radica en la forma de las hojas y tamaño de la planta. Como dato curioso se observó que las flores de estas plantas abren al salir el sol y cierran poco después del medio día, viviendo únicamente el día que abren.

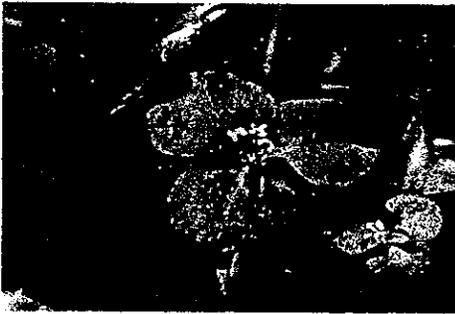


Figura 23. *Commelina coelestis* Will o *matlaxochitl*

Localización

Para éste trabajo se localizaron y coleccionaron las dos variedades de *Commelina coelestis*; ambas variedades crecen entre los meses de julio y octubre. La *Commelina coelestis* Will es la especie más robusta dentro de este género, se encuentra en campo húmedo o a la orilla de bosque húmedo, en altitud de 900-3000 metros. La *Commelina coelestis* Bourgeau vive en campo húmedo, bosque mixto de pinos y encinos, en altitud de 1000-2300 metros^{30,31}.

Proceso de recolección de las flores

La colecta de flores de *Commelina coelestis* Will y *C. coelestis* Bourgeau se hizo en el Boulevard De la Luz, en el Pedregal de San Ángel y en Tepechimilpa, recogiendo únicamente los pétalos, evitando cortar el cáliz y pistilo de la flor. Contando el total de pétalos en cada colecta. Para hacer una buena colecta, fue necesario hacerlo durante la mañana para encontrar la flor abierta y separar los pétalos con facilidad.

Proceso de extracción del colorante

A diferencia del *tlaceuilli*, del *matlalli* no se tiene ningún registro sobre el proceso de extracción del colorante durante la época prehispánica; por ello proponemos un proceso sencillo que no altere el color y la composición original.

El proceso de extracción empleado es el siguiente: primero se prensan los pétalos sobre un embudo con papel filtro, posteriormente se mide el volumen y el pH. Para almacenar el zumo se colocó en cajas de petri y se dejó secar al sol, después se pesó y guardó en frascos. El rendimiento del colorante se obtuvo mediante la cuenta del número de pétalos y su peso.

Como ya lo mencionamos, este color se obtiene de las flores de las commelinas, resultando como lo describe Sahagún "muy apreciable de ver", porque desde que se cortan los pétalos queda impregnado en los dedos ese bonito color azul dejando la inquietud de pintar con el cualquier cosa. También cabe mencionar la cantidad impresionante de flores que hay en el Jardín Botánico de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al extraer el zumo de los pétalos se obtiene un líquido azul celeste de baja densidad, el pH varía entre 5.3 y 5.43, es soluble en agua y al secar se obtiene un polvo azul oscuro parecido al índigo natural. El rendimiento de cada colecta se muestra en la tabla 8. Para ello se contó el número de pétalos y se pesaron, se midió el volumen de zumo y se peso ya seco.

Tabla 8 Rendimiento

Número de pétalos	Pétalos gr	Zumo líquido mL	Zumo polvo gr
2346	65.325	37	0.94352
2151	62.034	34	0.84492
1456	43.70	23	0.79310
975	28.326	17.3	0.67675
378	11.021	8	0.3028

Comportamiento del *matlalli*

El *matlalli* es soluble en agua, ácido acético, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, acetona, alcohol etílico, cloroformo; presentando coloraciones diferentes dependiendo del carácter ácido o básico de los mismos. Observándose tonos lilas y azules con soluciones ácidas y tonos de verdes y cafés con soluciones básicas. Esta prueba se puede hacer después de extraer el zumo de las flores o una vez seco, puesto que el color no varía cuando se disuelve en agua.

Sahagún menciona muchos de los elementos que se emplearon en la elaboración de las pinturas cuya función fue mas bien de modificadores de tonos de color. De los minerales menciona el *tequixquiltl*, el *tlalxócotl* y el *tenextli*. Dado que él los menciona como modificadores de los tonos de color, analizamos estos materiales en detalle. Posteriormente con ellos se cambia el tono del *matlalli* y se elaboran pinturas utilizando como base el *sacuum*.

El *tequixquiltl* es conocido actualmente como tequezquite y es descrito por Hernández¹² así como el *tlalxócotl* que se conoce como alumbre y el *tenextli* que es conocido como cal viva. El nombre y uso de estos minerales se conserva en la actualidad, siendo fácil la identificación y compra.

Tequixquiltl.- es un polvo mineral formado algunas veces por una mezcla de natrón (Na_2CO_3), halita ($\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y trona (NaCl) (Figura 24), su color varía de acuerdo al origen, se encuentra en tonos blancos, grises y cafés, al mezclar con agua se obtienen soluciones turbias de carácter básico, no es tóxico y es parcialmente soluble en agua. Abunda en las riveras del lago de Texcoco.

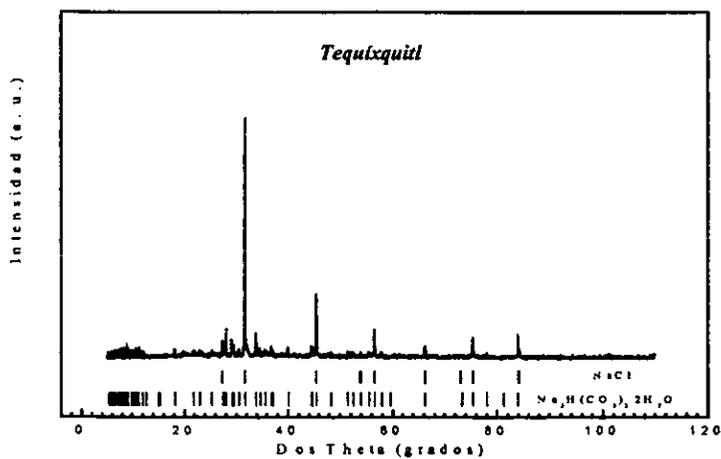


Figura 24

Tlaxócotl.- es un mineral blanco en forma de piedra, compuesto de sulfato doble de amonio y aluminio, $(\text{NH}_4)_2\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (Figura 25). Al molerlo queda en forma de polvo blanco, se encuentra en varias rocas y tierras, se utiliza como mordente desde la época prehispánica, es soluble en agua, las soluciones que se obtienen con agua son ácidas, incoloras y no tóxicas

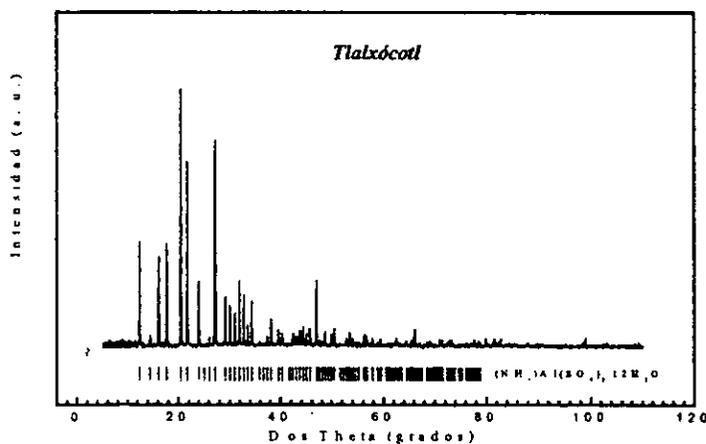


Figura 25

Tenextli.- es una piedra blanca, compuesta de óxido de calcio (CaO) (Figura 26), se obtiene al calentar, en hornos especiales, la piedra caliza quedando óxido de calcio anhidro que se hidrata parcialmente al contacto con la humedad del medio ambiente. En contacto con el agua se hidrata y pulveriza, dando una reacción exotérmica de carácter básico.

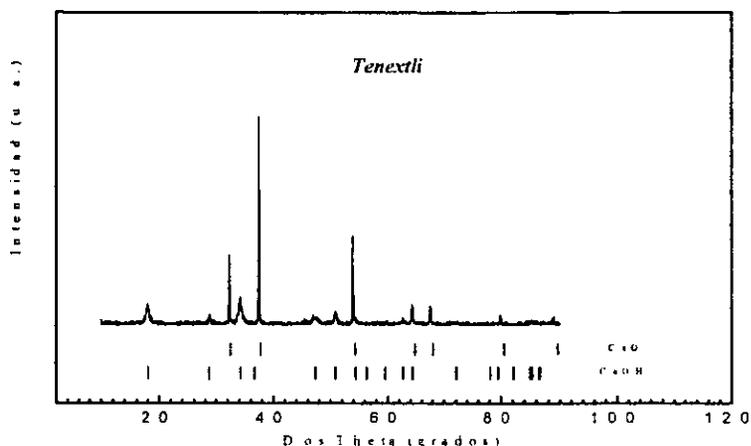


Figura 26

Soluciones acuosas con *tequixquiltl*, *tlalxócotl* y *tenextli*

El *tlalxócotl* y el *tequixquiltl* se molieron en un mortero de ágata hasta obtener un polvo fino para posteriormente preparar las soluciones con agua destilada en varias concentraciones. Del *tlalxócotl* se prepararon soluciones de 0.5 % y 1.0% en peso y de *tequixquiltl* se prepararon soluciones de 0.5%, 0.7%, 1.0%, 1.5% y 2.0% en peso.

Como el *tenextli* no es soluble en agua, se preparó primero una suspensión con 1% en peso de *tenextli* y agua. Una vez terminada la reacción, la cual es exotérmica, se tomó un poco de ella y se diluyó en agua a diferentes concentraciones 0.5%, 1.0%, 1.2% y 1.5% en volumen. La solución no es homogénea ya que se deposita un poco de cal en el fondo así que esperamos a que precipite para luego decantar y usar el agua decantada.

Los resultados se pueden observar en las tablas 9, 10 y 11. En general el *matlalli* presenta tonos estables de azul y verde para pH entre 3 y 9. Con el *tlaxócotl* no se mostró algún cambio importante en el color del *matlalli* debido al carácter ácido de la solución hace que se mantenga con el color original (Tabla 9). Los colores verde-azul obtenidos de la mezcla de *tequixquilt* con zumo son claros, brillantes y muy atractivos (Tabla 10). En general los colores que se obtienen con el agua de *tenextli* son opacos y poco atractivos (Tabla 11).

Tabla 9. *Tlaxócotl* y zumo

<i>Tlaxócotl</i>	Solución 1 0.5% peso 3.21	Solución 2 1.0% peso 3.41
pH		
Color Zumo	azul oscuro después de 5 min. aglutina. 22 hr después cambia a lila	azul oscuro a los 7 min. aglutina. cambiando a lila después de 24 hr

Tabla 10. *Tequixquilt* y zumo

<i>Tequixquilt</i>	Solución 1 0.5% peso 9.08	Solución 2 0.7% peso 9.25	Solución 3 1.0% peso 9.48	Solución 4 1.5% peso 9.68	Solución 5 2.0% peso 9.98
pH					
Color Zumo	azul estable	azul verdoso estable	azul verdoso después de 3 hr pasa a verde esmeralda y se mantiene estable	verde esmeralda después de un día cambia a café	verde después de 3 hr. cambia a café. un día después pasa a incoloro

Tabla 11. Agua de *Tenextli* y zumo

Agua de <i>tenextli</i>	Solución 1 0.5% volumen 7.50	Solución 2 1.0% volumen 9.03	Solución 3 1.2% volumen 9.64	Solución 4 1.5% volumen 10.80
pH				
Color Zumo	azul estable	Azul hora y media después cambia a verde estable	verde seco 15 min. después cambia a café	verde seco rápidamente pasa a café luego de un día es incolora.

Conforme a los resultados anteriores se hace un segundo experimento para conocer el cambio de color del *matlalli* respecto al pH, utilizando soluciones de NaOH y HCl completado el rango de pH (1 – 13)

Soluciones NaOH y HCl

La prueba se realizó agregando a la solución de *matlalli* una solución de ácido clorhídrico al 20% en volumen, para acidificar el medio y otra de hidróxido de sodio al 2% en peso para alcalinizar la solución. Cada gota de las soluciones de NaOH y HCl corresponde aproximadamente a 0.1 cc. La solución de *matlalli* se preparo con 10 mL de zumo y 90 mL de agua.

En primer lugar, se agregó el NaOH poco a poco, gota a gota, observando la coloración y anotando el pH cuando el color se hace más acentuado, observando hasta notar otro cambio de color. Se dejó reposar 10 min y se continuó con el HCl, agregando el ácido gota a gota y observando los mismos cambios de color como con el NaOH.

Los colores que se observan con estas soluciones son brillantes y se puede apreciar claramente el cambio de color conforme varía el pH. Tabla 12.

Para explicar el comportamiento del *matlalli* frente a los cambios de pH, suponemos se debe a la antocianina, ya que es uno de los componentes que da el color azul a las flores y es muy sensible a los OH del medio.

La antocianina pertenece al grupo flavonoide siendo el componente principal que da el color azul a las flores. Éste pigmento es soluble en agua y estable en soluciones concentradas, pero cuando se diluye se descompone rápidamente. La antocianina: normalmente dentro de una solución ácida aparece de color rojo y en una solución alcalina se torna de color azul. En la mayoría de los casos es estable con los ácidos y pasando de neutro a alcalino se vuelve inestable. El grupo flavonoide químicamente consta de dos bencenos y los carbonos en cadena como C₆-C₃-C₆ con OH.

Los nombres de las sustancias se obtienen según las distribuciones que se hagan de los bencenos con los carbonos. Por ejemplo: flavona, flavonol, flavanona, antocianina, etc. También donde se sitúa el OH y su numeración aparecen tonos variables desde una sustancia incolora, crema, amarilla, anaranjada, hasta roja, violeta y azul y casi siempre se forman con el OH como glucósido³³⁻³⁷.

Tabla 12. Variación de color

Solución Agregada	pH	Color
Inicio NaOH 2%	5.43	azul marino
	6.1	azul oscuro
	6.7	" "
	7.3	" "
	7.8	" "
	8.4	" "
	8.9	azul turquesa
	9.2	azul verdoso
	9.6	verde esmeralda
	9.7	verdoso
	9.9	verde intenso
	10.15	" "
	10.3	" "
	10.7	verde no cambia
	11.2	café
11.8	café claro	
12.3	incoloro	
HCl 20%	5.43	azul oscuro
	4.89	" "
	4.5	" "
	4.09	azul oscuro
	3.5	azul no cambia
	3.2	azul-lila
	2.8	lila
	2.3	lila
	1.8	lila

Espectroscopia óptica

En el espectro de absorción de una muestra seca de *matlalli* se obtuvo un máximo de absorción en 675nm (Figura 27), el cual es diferente al obtenido de la muestra de Azul Maya original y al del *tlaceuilli*. Hasta el momento, ninguno de los estudios realizados ²³ al colorante de la *Commelina coelestis* había reportado el espectro de absorción por reflectancia difusa, siendo ésta una aportación al conocimiento de este colorante.

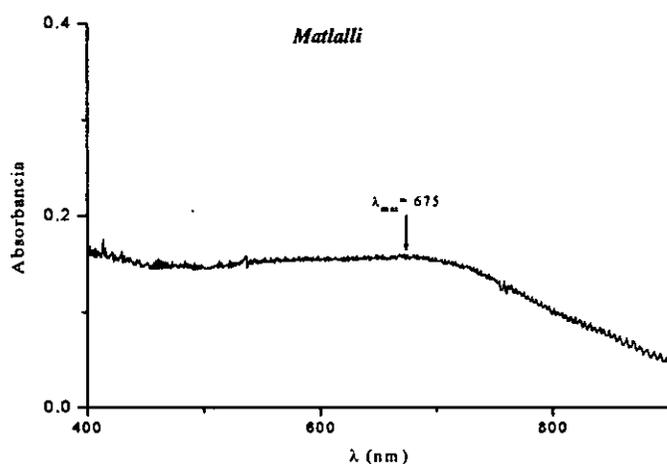


Figura 27

El patrón de difracción del *matlalli* fue amorfo porque la muestra contenía demasiadas impurezas y en el proceso de extracción no fue posible obtener cristales del colorante.

Procesos de elaboración de pinturas con *matlalli*

El proceso para elaborar pinturas a partir de *sacuum* y *matlalli* es diferente al utilizado para elaborar la pintura con *sacuum* y *tlaceuilli*, por que el colorante se usa liquido, sin que sea necesario agregar más agua a la arcilla para su homogeneización.

Proceso 1 (*matlalli* + *sacuum*)

Esta pintura se elabora a partir de *sacuum* y *matlalli*. En ella no pudimos utilizar el mismo rango de concentración que para la pintura con *tlaceuilli* por el estado líquido del colorante, buscando nuevamente el rango de concentración adecuado para obtener tonos azules parecidos al Azul Maya.

La pintura se elabora a partir de *sacuum* y zumo de *matlalli* en las siguientes concentraciones: 35%, 70% y 100% en volumen de zumo, usando como base 1 gramo de *sacuum*, mezclando mecánicamente y secando al vacío. La muestra se clasifica como MP10.

Como resultado observamos que ninguna muestra de pintura fue estable una vez seca. Después de secar al vacío el color azul desaparece marcando únicamente la orilla de la arcilla, por lo tanto no se da tratamiento térmico y se descarta la muestra correspondiente para la prueba de estabilidad química.

Proceso 2 (pintura con tonos verdosos)

Al encontrar muestras de Azul Maya con tonos verdosos, elaboramos una pintura a partir de *sacuum*, *matlalli* y *tequixquilt* o agua de *tenextli*, basándonos en los resultados obtenidos del cambio de color del *matlalli* con *tequixquilt* y agua de *tenextli* —Con el *tlaceuilli* no se obtienen tonos verdosos con ningún disolvente—.

Para la elaboración de la pintura se hace una solución de *tequixquilt* con pH 9.0, después se mezcla manualmente 1 gramo de *sacuum*, 12 mL de zumo de *matlalli* y 2 mL de la solución de *tequixquilt*, se seca al vacío y se muele para obtener una mezcla homogénea. De la pintura fresca con *tequixquilt* se obtiene un color verde esmeralda muy agradable, siendo muy parecido a algunas muestras de Azul Maya; sin embargo, al secarse la pintura se pierde el color y la muestra se vuelve incolora. La pintura con agua de *tenextli* se hace de la misma manera, sustituyendo únicamente la solución de *tequixquilt* por agua de *tenextli* con pH 9.0. Al igual que con el *tequixquilt* la muestra húmeda es verde, pero se vuelve incolora al secarse.

Pintura con Recubrimiento

Por la inestabilidad del *matlalli* frente a la arcilla fue necesario utilizar algunos recubrimientos prehispánicos; se probaron algunos de ellos para intentar estabilizar el color de la pintura húmeda.

Desde la época prehispánica la pintura mural ha sido uno de los medios de expresión artística de los mexicanos. Siendo un arte muy antiguo, su descubrimiento es reciente, ya que la primera descripción de murales mayas la da el explorador John Stephens en su libro publicado en 1843³⁸.

La técnica mural empleada por los antiguos mexicanos es aun muy discutida puesto que se habla de que emplearon pintura al fresco y al seco, concluyendo que no siempre usaron la misma técnica³⁸⁻⁴⁰ e independientemente de la técnica desde esa época los recubrimientos para proteger a las pinturas ya eran conocidos y utilizados tal y como lo menciona Clavijero⁴¹:

“...para dar mayor firmeza a sus colores se valían del glutinoso jugo del tzacuhlli y del excelente aceite de chía.”

Desde esa época hasta nuestros días se siguen utilizando algunos de estos recubrimientos y pegamentos aunque no en la misma escala. Michoacán Guerrero y Chiapas son de los pocos estados que siguen utilizando estos materiales. Por ejemplo para el laqueado de madera, jícaras y calabazas se sigue utilizando *axin* y aceite de *chía*, pero ya de manera artesanal.

Para nuestro estudio se utilizó el *axin* y el aceite de *chía*, describiendo a continuación: su localización, su proceso de obtención, sus propiedades y usos, tanto en la época prehispánica como en la actualidad

Axin o axe

Fernando Martínez ⁴² emplea la palabra betún dándole el significado que tenía en el siglo XVII : “ *cualquier sustancia natural de consistencia pastosa y pegadiza*” e historiadores de la cultura indígena lo llamaron betún.

La recolección del *axin* se hace cada año, al final de la temporada de lluvias. Es un insecto que vive entre los 5000 y 1500 metros de altitud se puede encontrar Michoacán, Chiapas, Yucatán, y es comercializado desde la época prehispánica. El nombre en Lengua Maya de estos gusanos, es el mismo reportado desde el siglo XVI en el Calepino de Motúl, donde además se describe que eran usados para hacer un ungüento o barniz para barnizar y pintar ^{10, 28}.

El *axin* es la grasa extraída de las hembras de los insectos, el proceso de obtención se describe a continuación: Los insectos aún con vida, se ponen a hervir en una olla con agua; después se machacan y se cuelan a través de una manta rala. La grasa se acumula en una batea con agua fría, luego se bate para que solidifique, se lava y se forman bolas que se envuelven en hojas de maíz. Al secarse se les forma una costra oscura, pero al interior se conserva el color mango, el cual bien preparado puede durar varios años. Para usarlo hay que derretirlo en baño María, pues el fuego directo lo seca y quema. Es un elemento básico para preparar el maque o laca ⁴³. La grasa del *axin* funde a 49°C y permanece semilíquida a temperaturas entre 26 y 29°C. Cuando se aplica a cualquier superficie se adhiere firmemente y no se desprende con agua. Es soluble parcialmente en alcohol. Sus mejores solventes son: éter, cloroformo, benceno y aguarrás ²⁸.

Aceite de *chia*

La función del aceite de *chia* es como secante o como lo menciona Clavijero ⁴¹ para dar firmeza a los colores. De las semillas de *chia* se extrae el aceite que se usa como recubrimiento. En algunos pueblos de Michoacán el aceite lo extraen de las semillas grises, para luego mezclarlo con *axin*, laqueando madera y jícaras. En Guerrero se laquea únicamente con aceite de *chia*, la técnica consiste en aplicar una capa de aceite, otra de mezcla de tierras y colorantes, para luego bruñir con una piedra. Una vez seca esta base se procede a la decoración.

Tratando de simular la base mural de la muestra original de Azul Maya, se pintó una capa delgada de hidróxido de calcio sobre un muro de concreto, una vez seco el hidróxido se pintó con las muestras de pintura que preparamos anteriormente sin recubrimiento y con recubrimiento.

La capa de hidróxido se hizo a partir de *tenextli* (cal viva) hidrolizándola con agua y mezclando hasta obtener una mezcla homogénea y fácil de manejar, pintando con ella el muro con una brocha de cerdas finas. Esta técnica mural se llama técnica al seco³⁹.

Para aplicar los recubrimiento se mezcla el aceite de *chia* o *axin* con las muestras de pintura hasta obtener una mezcla homogénea y después se pinta con ella sobre el hidróxido de calcio. El aceite de *chia* se extrajo prensando las semillas grises de *chia* y el *axin* se calienta a baño María puesto que es más fácil manejarlo líquido. Las pinturas sin secar se colocan directamente sobre el hidróxido de calcio para comparar con el efecto del recubrimiento sobre las pinturas.

De lo anterior se obtuvo que las pinturas con *matlalli*, *sacuum* y recubrimiento (*axin* o aceite de *chia*) o sin recubrimiento mantuvieron su color al momento de mezclarse, pero una vez pintada sobre el hidróxido, el color cambia de azul o azul-verdoso a café, finalmente quedando incoloro.

Ésta prueba se hace también a las pinturas con *tlaceuilli* observando que todas mantienen el color sin el recubrimiento. Sin embargo se observó un ligero tono verdoso al mezclarse con el *axin*, tono que se mantuvo al momento de pintar sobre el hidróxido de calcio.

Sumario

Se identificó y localizó la planta de donde se obtiene el *matlalli* (y por ende el *texotli*) como *Commelina coelestis*.

A partir de las flores de esta planta se extrae el colorante, y se propone un proceso simple de extracción.

Del estudio del *matalli* se obtuvieron datos importantes que muestran el cambio de color como función del pH de la solución, resumidos en la tabla 13.

Tabla 13. *MATLALLI*

pH	Lila menor a 3	Azul entre 3 y 9	Verde entre 9 y 10	Café entre 11 y 12	Incoloro mayor a 12
----	-------------------	---------------------	-----------------------	-----------------------	------------------------

Los colores obtenidos de la mezcla de *matalli* y *sacluum* son parecidos al Azul Maya cuando esta está húmeda pero se transforma al secarse. Para que esta mezcla de origen a la pintura de Azul Maya, es necesario encontrar el proceso que la estabilice.

Lo interesante del *matalli* es que cambia a color azul verdoso (similar al observado en los murales) al cambiar el pH de su solución a valores básicos alrededor de 9.0, lo que nos es posible obtener con el *tlaceuilli*. Consideramos entonces que el *matalli* podría ser una alternativa para explicar la elaboración del Azul Maya, si se encontrase en proceso adecuado para estabilizarlo.

Las pinturas con *matalli*, *sacluum* y recubrimiento (*axin* o aceite de *chía*) o sin recubrimiento mantuvieron su color al momento de mezclarse, pero una vez pintada sobre el hidróxido, en ambos casos el color cambia de azul o azul-verdoso a café, y finalmente se vuelve incoloro.

Capítulo IV

CONCLUSIONES

Se descubrió que la arcilla base del Azul Maya, el *sacuum*, desde el siglo XVI (y probablemente desde antes) no ha dejado de usarse como barniz de piezas cerámicas, y que actualmente se usa también para darle plasticidad a las pastas cerámicas.

Se obtuvo que dos muestras de Azul Maya con diferente tono de azul tienen la misma curva de absorción en la región visible con su máximo en una longitud de onda de 681 nm, lo que indica que la diferencia de tono de la pintura radica sólo en su concentración.

Se corroboró la estabilidad química y comportamiento térmico del Azul Maya reportada por Gettens², Kleber³ y Shepard⁵.

Con la intención de relacionarlos con el Azul Maya, se identificaron y localizaron las plantas de donde se obtienen los colorantes azules en el México prehispánico: el *tlaceuilli*, el *matlalli* y el *texotli*. El *tlaceuilli* se extrae de las hojas de la *Indigófera suffruticosa* Mill; el *matlalli* y el *texotli* se extraen de las flores de la *Commelina coelestis*.

A partir de *tlaceuilli* y *sacuum* se lograron elaborar pinturas con tonos similares al Azul Maya de Cacaxtla. Los espectros de absorción de nuestra pintura y el Azul Maya son isoelectrónicos teniendo un máximo de absorción en 681 nm; sugiriendo que el *tlaceuilli* sí puede ser el colorante del Azul Maya.

Sin embargo, la estabilidad química ante disolventes de la pintura hecha con *tlaceuilli* y *sacuum* no es comparable con la observada en el Azul Maya así como la generación de los tonos azul-verde. Lo que sugiere, que hay otros elementos que no han sido tomados en cuenta para la elaboración del Azul Maya; por ejemplo, el uso de barnices como recubrimiento de la pintura, o en la elaboración de la misma. Es decir, los elementos para elaborar el Azul Maya, no están todavía definidos; su elaboración sigue siendo un problema abierto.

En contraste con el *tlaceuilli*, el colorante *matlalli* es soluble en agua, y cambia su tonalidad de color con el pH de la solución de acuerdo a la tabla 13.

Los colores obtenidos de la mezcla de *matlalli* y *sacuum* son parecidos al Azul Maya en la muestra húmeda, aún en sus tonalidades azul-verde, pero se vuelve transparente al secarla. Por lo que se requiere un mayor conocimiento sobre este colorante, antes de intentar usarlo para reproducir el Azul Maya. Por ejemplo, la transformación que sufre por efecto de combinarse con los otros elementos empleados en el México Antiguo en la elaboración de tintas y pinturas mencionados en las fuentes primarias del siglo XVI: Entre ellos el *tlalxócotl*, *tequíxquiltl*, *tenextli*, *textotli*, *tezoatl*, *axin*, *chía*, *tzacútlil*, y *nacazcalotl*, además de ahondar en los procesos de elaboración que allí se mencionan.

REFERENCIAS

1. Cabrera Garrido, J. Ma. " El Azul Maya". Informes del Instituto de Conservación y Restauración de Obras de Arte, Arqueología y Etnología. No. 8. España. (1969)
2. Gettens, R.J. "Maya Blue: An unsolved problem in ancient pigments". *American Antiquity*, Vol. 27, No. 4: 557-564 (1962)
3. Kleber, R.L. et. al. "Etude et Identification du Blue Maya". *Studies in Conservation*, Vol. 12, No. 2: 41-56 (1967)
4. Morris, E. H. et. al. "The Temple of the Warriors at Chichen Itza, Yucatan" by. Carnegie Institution of Washington. Publication 406, Vol. 1, contrib. 60, p. 356 (1931)
5. Shepard, A.D. and Gottlieb, H.B. "Maya Blue: alternative hypothesis". Notes from a Ceramic Laboratory, num. 1. Carnegie Institution of Washington (1962)
6. Van Olphen, H. "Maya Blue: A clay organic pigment". *Science* 154: 645-646 (1966)
7. Shepard, A.D. and Pollock, H.E. "Maya Blue: an updated record". Notes from a Ceramic Laboratory, num. 1. Carnegie Institution of Washington (1971)

8. Littman, E.R. "Maya Blue- Further perspectives and the possible use of indigo as the colorant". *American Antiquity*, Vol. 47, No. 2: 81-102 (1982)
9. Yacamán, et. al. "Maya Blue paint: An ancient nanostructured material". *Science* 273: 223-225 (1996)
10. Arzápalo. *Calepino de Motul, Diccionario Maya-Español, Tomo I*, editado por la Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F., México, 1995, página 154.
11. Sahagún, Fray Bernardino. *Códice Florentino. Cap. XI, Vol. 3*, editado por el Archivo General de la Nación, México, 1989, pp. 374.
12. Hernández, Francisco. *Historia natural de la Nueva España. Tomo II*, editado por la Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1959, pp. 39-41, 112, 114.
13. De la Cruz, M. *Libellus de Medicinalibus Indorum Herbis. Traducción latina de Juan Badiano*. Editado por el Instituto Mexicano del Seguro Social, México, 1964, p.283.
14. Molina, Fray Alfonso. *Vocabulario en lengua castellana y mexicana*. Ed. Porrúa, México, 1977, pagina 23.
15. Gettens, R.J. y Stout, G.L. *Painting Materials: A Short Encyclopedia*. Ed. Van Nostrand, New York, EUA, 1942.
16. Arnold, D.E. and Bohor, B.F. "Atapulguite and Maya Blue. An ancient mine comes to light". *Archaeology*, Vol. 28, No. 1: 23-29 (1975)

17. Albella, J. M. Introducción a la Ciencia de Materiales. Ed. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España, 1993.
18. Willard, H. H. Métodos Instrumentales de Análisis. 4ª ed. Ed. D. Van Nostrand. EUA, 1970.
19. Cullity, B. D. Elements of X-ray Diffraction. 2ª ed. Ed. Adisson Wesley, 1978.
20. D.E. Arnold and Bohor, B.F. "Attapulguite and Maya Blue. An ancient mine comes to light". *Archaeology*, Vol. 28, No. 1: 23-29 (1975)
21. Galán, P. "Palygorskite in eocene-oligocene lagoonal environment, Yucatán, México". *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, volumen 13, numero 1, pp. 94-103 (1996)
22. Tikul. Es Señor Manuel Ayala Cach', alfarero del pueblo de Tikul, Yucatán México, con domicilio en Calle 23 No 287 y teléfono 01(997) 20281, llevó al Dr. Bokhimi, a las minas comunales de donde hay *saculum*, para extraer algunas muestras. Le explicó también que la usan para mejorar la plasticidad de las pastas empleadas en la elaboración de su cerámica.
23. Tepakan. El conocimiento de la localización de la arcilla y su uso, fue proporcionado al Dr. Bokhimi por la Señora María Silva Cahun Cob, Calle 10 No. 59, Tepakan Campeche México, teléfono 01(996)10287, y la Señorita Juana Ventura Cob Che, vecina de la misma calle cuya vivienda se encuentra en el número 45, ambas miembros de la Alfarería Lolk'at en Tepakan Campeche.
24. Besoain. Mineralogía de las arcillas de suelos. Editado por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Costa Rica, 1985.
25. Velde, B. Introducción to clay minerals. Ed. Chapman & Hall, EUA, 1992.

26. Singer. Enciclopedia de la química industrial: cerámica industrial. Tomo 9, Vol. 1. España, 1970.
27. Grim. Clay Mineralogy. 2a ed. Ed McGraw-Hill, EUA, 1968.
28. Castelló Yturbide Teresa. Colorantes Naturales de México. Editado por Industrias Resistol, México, 1988.
29. Campos, C. B. Tres Colorantes Prehispánicos. Ed. Patria, México, 1985.
30. Martínez Maximino. La Flora del Estado de México. Tomo III. Editado por la Dirección de Recursos Naturales, México, 1979.
31. Reiche, K.F. Flora excursoria en el Valle de México. Editado por la Dirección de Recursos Naturales, México, 1985.
32. Fritz, M. La Química de la Materias Colorantes. Ed. Aguilar, España, 1990.
33. Shirata, Y. Colorantes Naturales. Tesis Profesional. Universidad de Puebla, Puebla 1988.
34. Hayashi, K. et. al. "Blue Anthocyanin from the Flowers of commelina the Crystallisation and some properties thereof." Proc. Japan Acad. Vol. 34: 373-378 (1958)
35. Bentley, K. W. The Natural Pigments. 3a ed. Ed. Interscience, EUA, 1986.
36. Kondo, T., et. al. "Structural basis of blue-colour development in flower petals from commelina communis." Nature Vol 35: 515-518 (1992)

37. Mitsui, S., et. al. "Future Studies on Commelinin a Crystalline Blue Metallo-anthocyanin from the Flowers of Commelina." Proc. Japan Acad. Vol. 35: 169-174 (1959)
38. Bernal, Ignacio "Pinturas precolombinas de México". Editado por la UNESCO, México, 1963.
39. Bontce, J. Técnicas y Secretos de la Pintura. 10ª ed. Ed Leda, España, 1989.
40. Ferrer, M. A. Pintura Mural, su soporte conservación, restauración y las técnicas modernas. Editado por la Universidad de Sevilla, España, 1990.
41. Clavijero, Francisco. Historia Antigua de México, pp. 247-249. 1ª ed. Ed. Porrúa, México, 1945.
42. Fernando Martínez Cortés. Pegamentos Gomas y Resinas en el México Prehispánico. Ed. SEPSETENTAS, México, 1974.
43. Fray Francisco Ximenez. Cuatro libros de la naturaleza. 1614. Imprenta de la Secretaria de Fomento. México, 1888.