



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

EL COPAL: BIOLOGÍA, PERSPECTIVAS CULTURALES Y
SU IDENTIFICACIÓN EN PIEZAS ARQUEOLÓGICAS

T E S I S I N A
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
B I Ó L O G A
P R E S E N T A:
ROCÍO DANIELA MARTÍNEZ GODOY

TUTORA:

M. en C. MAYRA LEÓN SANTIAGO

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO,

2022





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 esta 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.

HOJA DE DATOS DEL JURADO

1. Datos del alumno

Martínez

Godoy

Rocío Daniela

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Biología

312323787

2. Datos del tutor

M. en C.

Mayra

León

Santiago

3. Datos del sinodal 1

Dr.

Ricardo

Reyes

Chilpa

4. Datos del sinodal 2

M. en C.

Rosa María

Fonseca

Juárez

5. Datos del sinodal 3

M. en C.

Abigail

Aguilar

Contreras

6. Datos del sinodal 4

Dra.

Silvia Laura

Guzmán

Gutiérrez

7. Datos del trabajo escrito

El copal: biología, perspectivas culturales y su identificación en piezas arqueológicas

63 pp.

2022

Palabras clave: arqueobotánica, copal, cromatografía de gases-masas, FT-IR

DEDICATORIA

A mi familia, cuyos miembros, a su manera y en su tiempo, me inculcaron el amor a la ciencia y al arte, haciendo nacer en mí una profunda admiración por nuestra herencia cultural.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por ser las raíces que me han sostenido a lo largo del tiempo, ayudándome a conformar todo lo que soy y, siendo ejemplo de todo cuanto anhelo ser.

A mi hermano, por su complicidad, cariño y por inspirarme constantemente a través su determinación para alcanzar sus metas.

A Estefanía Tejeda Vaca y Leonardo Martínez Trueba, por ser ejemplo constante de dedicación y perseverancia, por su apoyo incondicional a lo largo de la carrera y, especialmente, por brindarme la dicha de su amistad.

A Keren Alva Sandoval, quien fue testigo de todas las transformaciones que este proyecto atravesó y, quien siempre confió en que superaría cada peripecia, alentándome incesantemente con su ejemplo, cariño y amistad.

A Patricia Hernández y Priscila Arcos, quienes, sin importar el tiempo o la distancia, no han dejado de acompañarme con su bella amistad, dándome la oportunidad de compartir con ellas la dicha y el desencanto, pero siempre, inspirándome con su fortaleza, empatía y libertad.

A Ana Luisa Escalona Sarabia y Sara Melissa Pacheco Galicia, por acompañarme con su amistad a lo largo de los años, en el sinuoso camino del crecimiento personal y profesional.

A todos los profesores que han contribuido en mi formación, particularmente a la Dra. Elizabeth Chávez y a la M. en C. Getsemaní Villanueva, quienes magnificaron mi admiración por las plantas, mostrándome que su belleza radica en su complejidad; al M. en D. Carlos Francisco De la Mora, por recordarme lo fascinante que es la Química y todos los secretos que nos ayuda a develar pero, aún más, por alentarme a hacer realidad mis anhelos, mostrándome que la ciencia y el arte confluyen incesantemente.

A la M. en C. Mayra León Santiago, por su apoyo constante a lo largo de la realización de este proyecto, por permitirme adentrarme en el mundo de la preservación del patrimonio cultural a través de las técnicas de química analítica, dotándome de nuevas perspectivas para mi futuro.

A la M. en Estudios Mesoamericanos Rocío Velasco Fuentes, por permitirme conocer su trabajo en el rescate de los testimonios arqueológicos de las culturas del Centro de Veracruz, inspirándome en la realización de este proyecto y haciéndome anhelar que, algún día, yo también pueda contribuir en el rescate y preservación de nuestro patrimonio cultural.

A la Dra. Marisol Reyes Lezama, la M. en C. Mayra León Santiago, al M. en C. Everardo Tapia Mendoza y a Edwin Galicia Florín, por el apoyo brindado en el Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural (LANCIC) a través de los proyectos CONACYT LN279740, LN293904 y LN299076.

A los miembros del jurado, por su interés en mi proyecto y por todos sus comentarios, permitiéndome enriquecer mi trabajo.

A todas aquellas personas que han formado parte importante de mi camino y que, de una u otra forma, me ayudaron a llegar a este momento.

Acompañar a Ignacio Bernal, director del Museo Nacional de Antropología, a descubrir un México que aún sigue enterrado emociona a Leonora. Bernal le enseña que, *para reconstruir una cultura, lo más importante son los objetos de la vida diaria*, y los recoge con cuidado.

Leonora, Elena Poniatowska, 2011.

Índice

Resumen	1
Introducción	2
Antecedentes	4
Justificación	5
Objetivos	6
Metodología	6
Capítulo I. Caracterización botánica del copal	7
1.1 El copal mexicano	7
1.2 Plantas productoras de copal y su distribución en México	8
1.3 Canales resiníferos en la familia Burseraceae	11
Capítulo II. El copal, perspectivas culturales	13
2.1 Colecta del copal	13
2.2 El uso del copal en el México prehispánico	15
2.3 Usos actuales del copal en México	16
Capítulo III. Química de las resinas	18
3.1 Composición química de las resinas	18
3.2 Los biomarcadores arqueológicos	21
Capítulo IV. Técnicas de química analítica en el análisis de muestras arqueológicas	22
4.1 Cromatografía de gases con acoplamiento a espectrometría de masas (CG-EM)	22
4.1.1 Métodos de extracción para muestras de resinas	26
4.2 Espectrometría en el infrarrojo-ATR	27
4.2.1 El estudio de resinas mediante espectrometría IR	30
Capítulo V. Detección del copal en muestras arqueológicas mediante la CG-EM y FT-IR	32
5.1 El copal como adhesivo en mosaicos Aztecas/Mixtecas en el Museo Británico de Londres	32
5.2 Copal en una ofrenda al norte de Veracruz	35
5.3 Identificación de resina de copal en vasijas prehispánicas del sitio arqueológico El Zapotal, Veracruz, pertenecientes al Periodo Clásico	36
Discusión	40
Conclusión	46
Referencias	47
Anexo. Especies pertenecientes a la familia Burseraceae aprovechadas como fuentes de copal en México, sus nombres comunes y su ubicación geográfica	62

Resumen

El copal, resina producida por especies de la familia Burseraceae, representa un elemento importante de la cultura mexicana, formando parte de diferentes rituales (ceremoniales, medicinales, festivos, etc.), algunos de los cuales tienen un origen prehispánico. Lo anterior se ha constatado a través de diversos registros arqueológicos como códices y vasijas, así como por los restos botánicos contenidos en estas últimas, como foliolos, fragmentos de corteza y resina. Sin embargo, se ha reconocido que la condición fragmentaria de los mismos o la falta de suficiente material comparativo, son factores que limitan la identificación del copal en contextos arqueológicos.

Teniendo como objetivo principal el incentivar el desarrollo de trabajos de investigación entre la biología y la arqueología, en el presente trabajo se hace una revisión del origen botánico del copal en México y su significado en la cultura mexicana a través del tiempo. También, se presenta a la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG-EM) y la espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR, por sus siglas en inglés), como herramientas complementarias en los trabajos arqueobotánicos de identificación de copal. Finalmente, se analizan tres trabajos de investigación donde se empleó al menos una de las técnicas antes mencionadas, para determinar la presencia de copal en piezas arqueológicas.

De acuerdo con la investigación bibliográfica realizada, en la actualidad, la resina de 18 especies pertenecientes a la familia Burseraceae es aprovechada como copal en México. Por otra parte, en el estudio de resinas arqueológicas, es fundamental tomar en cuenta que factores como su posible origen botánico, el tiempo de exposición a las condiciones ambientales, y los procesos a los que fueron sometidas por las culturas antiguas, influyen en la composición química de las mismas, así como en las consideraciones técnicas que se deben tener al trabajar con CG-EM y FT-IR. Tomando en cuenta lo anterior, se propone complementar el estudio de los copales analizando si existen diferencias en su composición debido a su distribución geográfica, así como conocer su constitución en los restos calcinados de la resina quemada.

Introducción

La etnobotánica es una disciplina que se dedica al estudio de la relación que ha mantenido y/o mantiene una comunidad con las plantas que tiene a su alcance (Casas *et al.*, 2016; McClung de Tapia, 1990). En México, los registros más antiguos de esta disciplina se encuentran en tres fuentes documentales del siglo XVI (Ríos *et al.*, 2012): 1) el códice *Libellus Medicinalibus Indorum Herbis* (Librito de Hierbas Medicinales de los Indios), también conocido como Códice De la Cruz-Badiano, escrito en 1552 (Casas *et al.*, 2016; INAH, s/f; McClung de Tapia, 1990), 2) el Códice Florentino de Fray Bernardino de Sahagún, cuyo nombre original es *Historia general de las cosas de la Nueva España*, datado entre 1578 y 1580 (Casas *et al.*, 2016; Sánchez *et al.*, 2012; De Sahagún, 1577), 3) y el redactado por Francisco Hernández de Toledo entre 1571 y 1576, *Historia Natural de la Nueva España* (IBUNAM, s/f; UNAM, 2015).

Los códices mesoamericanos también han sido una fuente importante de información pues, en ellos se han descifrado diferentes aspectos de la vida de nuestros antepasados. Dictados por sacerdotes o sabios indígenas (*tlamatinime*), y registrados por los *tlacuiloqueu* (del singular *tlacuilo*: pintor o ilustrador) a través de pictogramas, en muchos de ellos se incluían descripciones sobre los recursos botánicos con los que contaban, la forma en que los aprovechaban e inclusive, si alguno formaba parte del tributo que debían pagar a algún gobernante (Bye & Linares, 2016; Casas *et al.*, 2016; Hernández-Ramírez, 2020). De hecho, muchos de los códices eran dedicados a los dioses, y como tal, eran parte esencial de la cultura de los pueblos. Sin embargo, la mayoría de ellos fueron destruidos durante la época colonial por mandato de la Iglesia Católica (Casas *et al.*, 2016), quedando, algunos de ellos, en repositorios en el extranjero (Bye & Linares, 2016).

Considerando que los códices prehispánicos carecen de texto y que su interpretación no es sencilla para quienes no se encuentran especializados en el área, resalta la importancia de los códices novohispanos, ya que al ser escritos en español, latín y náhuatl, hoy día funcionan como objetos de estudio por parte de diferentes disciplinas, contribuyendo al conocimiento de las culturas indígenas precolombinas y, en el caso de la etnobotánica, a la comprensión de relación que los humanos han desarrollado a lo largo del tiempo con las plantas (Bye & Linares, 2016; Ríos *et al.*, 2012).

Por otra parte, la arqueobotánica, se basa en la identificación taxonómica de los materiales de origen vegetal (polen, semillas, madera, flores, resinas) que fueron hallados en sedimentos arqueológicos (Montúfar, 1998), de tal suerte que, los hallazgos arqueobotánicos también han contribuido al conocimiento del uso que los humanos le daban las plantas en la antigüedad (Casas *et*

al., 2016), tal es el caso de los restos vegetales descubiertos por el arqueólogo Richard Stockton MacNeish, durante sus excavaciones en cuevas del Valle de Tehuacán, Puebla, a inicios de la década de los sesentas. Sus hallazgos aportaron información sobre la domesticación y el cultivo de diversas plantas, entre ellas el maíz (Casas *et al.*, 2016; García-Cook, 1997), cuyas mazorcas más antiguas tuvieron una datación de 5,000 años, aproximadamente (Long *et al.*, 1989).

Otro ejemplo de este tipo de hallazgos arqueológicos, los obtuvo Edward H. Thompson entre 1904 y 1911 al explorar el Cenote Sagrado (Cenote de Sacrificios) de Chichén Itzá, Yucatán. Dentro de los diversos objetos que rescató (huesos, vasijas de cerámica, piezas de oro y jade, entre otros), se encontraban textiles de algodón, calabazas y restos de copal en el fondo de vasijas pintadas, siendo estos últimos el material más abundante (Coggings & Ladd, 1992), llegando a ser más de 200 piezas de copal las que actualmente se encuentran preservadas por el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) (Montúfar, 2007). Se ha descrito que el copal era una ofrenda recurrente realizada por los mayas precolombinos pues, simbolizaba parte del alimento de los dioses, además de que al ser quemada permitía la comunicación con las deidades (Morehart, 2002).

Así pues, como describe Montúfar (1998), es gracias a la arqueobotánica que se puede definir, *“en ocasiones con base en la importancia etnobotánica actual, las plantas que sirvieron como alimento, como leña, como materiales de construcción, las que se utilizaron en la medicina, en la elaboración de textiles y en cestería, las plantas de uso ceremonial y desde luego, aquellas que reflejan prácticas de cultivo, entre otros satisfactores, sin soslayar su significado ecológico.”* De hecho, la Dra. Montúfar ha realizado una importante labor en la identificación de macrorrestos arqueobotánicos en nuestro país, siendo la resina de copal uno de sus principales objetos de estudio.

Antecedentes

Hablar del copal en la arqueología, es hablar de la Dra. Aurora Montúfar López. Egresada de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional, y siendo Doctora en Ciencias por la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, ha participado en las investigaciones de diferentes sitios arqueológicos en México, lo que también la ha llevado a desempeñarse como profesor investigador en el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH).

Como la misma doctora Montúfar lo describió en el 2014 para la revista *Arqueología Mexicana*, fue en el año de 1991 cuando fue aceptada en el Proyecto Templo Mayor, dirigido por el arqueólogo Eduardo Matos Moctezuma, donde pudo incursionar en el estudio de los restos arqueobotánicos del sitio. Aplicando diferentes métodos, ha logrado identificar más de 70 especies de plantas que formaban parte de las ofrendas del Templo Mayor de Tenochtitlan, como el maguey, el ahuehuete, semillas de calabaza, plantas comestibles como el frijol, el jitomate y el chile.

A nivel nacional, la identificación del copal en contextos arqueológicos ha sido realizada principalmente por la Dra. Aurora Montúfar, concentrando sus estudios en los hallazgos arqueobotánicos del Templo Mayor de Tenochtitlan (TMT). Dichos trabajos se han basado en la caracterización morfológica de fragmentos de copal, foliolos y astillas (fracciones de corteza) rescatados del sitio, y que fueron comparados con material herborizado de algunas especies de la familia Burseraceae depositadas en la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Chapingo, permitiendo así, su identificación taxonómica como fragmentos de *Bursera bipinnata* (Montúfar, 2004; 2012).

Así pues, fue a través de los macrorrestos de *Bursera bipinnata* (foliolos, fragmentos de corteza y resina) en distintas ofrendas del TMT, la información de distintas fuentes documentales que describían el uso ceremonial que tenía el copal en la época prehispánica (como el código Borbónico o el Borgia), y que éste formaba parte del tributo que se recibía en la ciudad de Tenochtitlan procedente de las provincias de Tlachco (actual Taxco Viejo), Tepequacuilco (Tepecoacuilco) y Tlalcosauhtitlan (Tlalcozotitlán), en el presente estado de Guerrero (Barlow, 1992; Mohar, 1987), así como los análisis de flotación realizados en los laboratorios de paleobotánica del INAH; que se determinó que parte del sedimento interno de las cazoletas de los sahumerios localizados en la ofrenda 130 del Templo Mayor correspondía a polvo de copal (García, 2015).

Si bien, el conocimiento de la flora, su distribución geográfica, o los registros arqueológicos, pueden ayudar a determinar los recursos botánicos que fueron empleados por nuestros antepasados, con base en muestras de semillas y otras partes de las plantas recuperadas de los sitios de excavación, se reconoce que aspectos como la mala preservación y/o condición fragmentaria de las mismas, así como la falta de suficiente material comparativo (arqueológico y contemporáneo), han llegado a complicar la identificación de los restos arqueobotánicos (McClung de Tapia, 1991). Sin embargo, gracias al avance en las técnicas de química analítica y su capacidad de identificar compuestos de origen vegetal o animal (conocidos como biomarcadores), ha sido posible el estudio de los residuos orgánicos presentes en sedimentos y piezas de cerámica, ampliando la información disponible para los arqueólogos (Evershed, 2008; Philp & Oung, 1988).

Justificación

El copal es un recurso forestal no maderable, el cual ha sido aprovechado de manera tradicional desde tiempos prehispánicos, pudiendo hallarse referido en códices precolombinos y fuentes documentales coloniales. La presencia de fragmentos de esta resina en contextos arqueológicos, así como los macrorrestos de las plantas de las que pudo haberse extraído, han conjuntado las áreas de la Arqueología y la Biología, promoviendo estudios interdisciplinarios que enriquecen el conocimiento etnobotánico y ambiental que se tiene del pasado. Sin embargo, al reconocer las limitaciones que ambas disciplinas pueden presentar en la identificación de residuos orgánicos en vasijas, sedimentos y otras matrices, ha sido necesario recurrir a análisis químicos que implementan técnicas de alta sensibilidad para la detección de compuestos orgánicos.

Cabe señalar que, los estudios donde se aplican técnicas de química analítica para la identificación de compuestos asociados al copal son escasos en nuestro país, por lo que se considera importante analizar aquellos que se han realizado para la identificación de dicha resina en contextos arqueológicos y, donde se han aplicado técnicas como la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG-EM), así como la espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR, por sus siglas en inglés), de tal manera que se puedan difundir los alcances que éstas han tenido en la arqueobotánica, y se pueda seguir promoviendo el trabajo en conjunto de arqueólogos, químicos y biólogos, en favor del estudio y la preservación del patrimonio cultural.

Objetivos

General

Incentivar el desarrollo de trabajos de investigación entre la Biología y la Arqueología a través de la recopilación, presentación y análisis de trabajos de investigación donde se haya utilizado la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG-EM) y/o la espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR) para la identificación del copal en diferentes tipos de piezas arqueológicas originarias de México.

Particulares

- ❖ Caracterizar al copal desde una perspectiva biológica, etnobotánica y química.
- ❖ Describir el fundamento de las principales técnicas de química analítica empleadas en la identificación de resinas arqueológicas.
- ❖ Exponer tres casos de estudio donde utilizaron técnicas de CG-EM y/o FT-IR para la identificación de copal en contextos arqueológicos.
- ❖ Identificar y resumir las consideraciones técnicas relevantes descritas en los casos de estudio presentados.

Metodología

La información obtenida para la realización de este trabajo, se obtuvo a través de las bases de datos de TESIUNAM, ScieceDirect, Scopus y Google Scholar. Para la selección de los casos de estudio, se establecieron diferentes estrategias de búsqueda utilizando las palabras clave: copal, Mexican copal AND Burseraceae, Mexican copal AND Burseraceae AND archaeology AND chemical characterization. Con ello, se pretendió que los resultados se restringieran a aquellos estudios donde se presentara el análisis de la resina de copal, proveniente de la familia Burseraceae, y que hubiera sido hallada en contextos arqueológicos. A partir de ello, se seleccionaron trabajos donde se hubieran realizado análisis mediante alguna técnica de química analítica, retomando aquellos donde se empleara la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG-EM) y/o la espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR).

Capítulo I. Caracterización botánica del copal

De acuerdo con datos de la CONABIO (2021b), existen alrededor de 12,000 especies de plantas productoras de resinas en el mundo, de las cuales 11, 500 pertenecen a la división Magnoliophyta, mientras que 500 son coníferas (división Coniferophyta). Se ha descrito, de manera general, que las resinas son exudados útiles contra la acción de agentes patógenos como insectos y microorganismos, siendo liberadas cuando los árboles son heridos (Fahn, 1988; Zulak & Bohlmann, 2010).

Las resinas forman parte de los productos forestales no maderables donde se encuentran otros exudados como las gomas, los aceites esenciales y los tintes, los cuales tienen una larga tradición de uso por los humanos (Murugesan *et al.*, 2012), llegando a formar parte de distintas culturas de África nororiental, la Península Arábiga, la India y, por supuesto, las mesoamericanas (CONABIO, 2008). Por lo tanto, describir al copal desde el aspecto biológico, cobra importancia para su posterior contextualización en el ámbito arqueológico de México.

1.1 El copal mexicano

La palabra copal proviene del término náhuatl, *copalli = que huele*, el cual describe a las resinas que se quemaban en la antigüedad con diversos propósitos (Espinosa *et al.*, 2008), así como a las plantas que las producían (CONABIO, 2008). De tal manera que, en Mesoamérica se denomina *copal* a la mayor parte de las resinas aromáticas que se usan como incienso (Mills & White, 1977). Aunque, dependiendo de la especie de la planta y la lengua indígena, el término puede variar (Montúfar, 2012).

Cabe mencionar que, dicho vocablo ha trascendido a otros países por lo que en el mundo se conocen distintos tipos de copales, como el copal de Zanzibar en África Oriental, obtenido a partir de *Hymenaea verrucosa* (Crowther *et al.*, 2015), el copal de Nueva Zelanda (*Agathis australis*), o el copal de Pará en Brasil (*Hymenaea courbaril*), por mencionar algunos (Montúfar, 2012). De acuerdo con la interpretación de la obra de Francisco Hernández, *Historia Natural de la Nueva España* (siglo XVI) realizada por Montúfar (2012), en el México colonial se conocían distintas plantas resiníferas, correspondiendo a especies de las familias Burseraceae, Anacardiaceae y Fabaceae.

En México y en la región mesoamericana, la mayor de las resinas conocidas como *copal* pertenecen a la familia de las burseras (Mills & White, 1977; Montúfar, 2012). La familia Burseraceae (orden Sapindales), representa una importante fuente de resinas y aceites esenciales, siendo conformada por alrededor de 20 géneros y más de 600 especies (Becerra & Venable, 1999;

Rzedowski & Guevara-Féfer, 1992) que se distribuyen en los trópicos subhúmedos y secos de América, África y Asia (CONABIO, 2008).

Los géneros que destacan en la familia son *Boswellia*, *Commiphora* y *Bursera*, cuyas resinas se conocen como *olíbano*, *mirra* y *copal*, respectivamente (Becerra & Venable, 1999). En México existen 102 especies de la familia Burseraceae, siendo endémicas el 77% de ellas (Sosa *et al.*, 2018). Los géneros que habitan en el territorio mexicano son *Protium*, *Bursera*, *Commiphora*, *Beiselia* y *Terebinthus* (Cházaro *et al.*, 2010), siendo *Bursera* uno de los más representativos con más 80 de especies (Quiroz & Magaña, 2015; Rzedowski & Calderón de Rzedowski, 2005; Toledo, 1982).

El género *Bursera* se divide en dos secciones o subgéneros *Bullockia* (o *Elaphrium*) y *Bursera*. La primera sección corresponde a las especies arbustivas (1-3 m de altura) y arbóreas (4-12 m de altura) de cortezas lisas y grisáceas, frutos bivalvados y con mayores propiedades aromáticas (los copales), que se distribuyen en climas tropicales semiáridos. En la segunda sección, se agrupan plantas de frutos trivalvados y cortezas exfoliantes, como los árboles mulatos que se hallan en el trópico húmedo y, los cuajotes (del náhuatl *quauitl* = árbol y *xiotl* = lepra), árboles del tamaño de los copales, pero de climas subhúmedos y semiáridos (CONABIO, 2008; Mc Vaugh & Rzedowski, 1965; Toledo, 1982).

1.2 Plantas productoras de copal y su distribución en México

El género *Bursera* es característico del tipo de vegetación, selva baja caducifolia (SBC), también denominado, bosque tropical caducifolio o bosque tropical estacionalmente seco (BTES) (CONABIO, 2008; De-Nova *et al.*, 2012; Pompa *et al.*, 2017). En México, la presencia de la SBC se ha asociado a las elevaciones producidas por la Sierra Madre Occidental y el Cinturón Transvolcánico mexicano (De-Nova *et al.*, 2012), extendiéndose desde los 60 a 2,020 m de altitud, con temperaturas medias de 19 a 27.4 °C y una precipitación anual que oscila entre los 482 y 1,370 mm (López-Toledo *et al.*, 2012).

La SBC es característica de regiones con clima cálido, donde dominan los árboles de entre 5 y 15 m de altura, que pierden sus hojas durante la temporada de sequía (López-Toledo *et al.*, 2012; Villaseñor & Ortiz, 2014). De acuerdo con De-Nova y colaboradores (2012), en México se distinguen siete regiones principales de este tipo de vegetación donde se distribuyen las especies de *Bursera*, siendo estas: la región de la Península de Baja California, la Vertiente Noroeste del Pacífico Mexicano, la Costa del Pacífico Mexicano Central, la Cuenca del Río Balsas, el Valle de Tehuacán, el Golfo de

México y la Península de Yucatán (Fig. 1). Aunque la mayor diversidad de dichas especies se establece en la vertiente del Pacífico mexicano (Rzedowski & Kruse, 1979) y la máxima concentración de formas y de las poblaciones, en la Cuenca del Balsas (Miranda, 1947; Toledo, 1982).

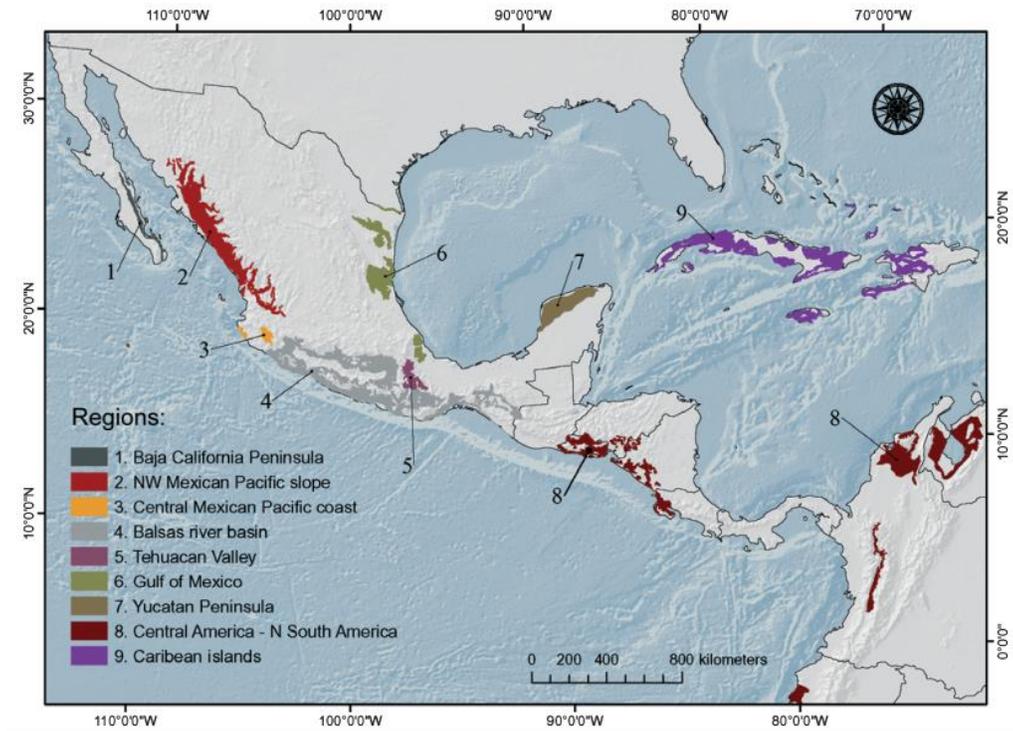


Fig. 1. Regiones de distribución del género *Bursera* en el bosque tropical estacionalmente seco (BTES), en México y otros países de América Latina. Si bien el BTES se puede encontrar extendido de manera continua a lo largo de dichas áreas, se considera la distribución discontinua del género, dadas las barreras altitudinales. Reproducido de De-Nova *et al.* (2012).

En México, la sección *Bullockia* comprende alrededor de 40 especies (Rzedowski & Calderón de Rzedowski, 2005), algunas de ellas con usos variados en la actualidad. Sin embargo, en lo referente a la extracción de resina de copal, se pueden mencionar las siguientes especies: *B. bipinnata*, *B. glabrifolia*, (Rzedowski *et al.*, 2004), *B. copallifera*, *B. citronella*, (CONABIO, 2008), *B. cuneata*, *B. palmeri*, *B. penicillata* (Quiroz & Magaña, 2015), *B. excelsa* (Montúfar, 2016), *B. graveolens*, *B. laxiflora*, *B. tomentosa* (Blancas *et al.*, 2022), *B. linanoe*, *B. microphylla* (Gigliarelli *et al.*, 2015), y *B. vejar-vazquezii* (Guízar & Sánchez, 1991). En lo que respecta a la sección *Bursera*, conformada por 42 especies (Rzedowski & Calderón de Rzedowski, 2005), se ha mencionado que la resina de *B. ariensis* (Rzedowski *et al.*, 2004), *B. fagaroides* (Morales-Serna *et al.*, 2013) y *B. simaruba* (Quiroz

& Magaña, 2015; Rzedowski & Calderón de Rzedowski, 1996), también han sido aprovechadas como incienso.

Si bien, se puede apreciar que las especies del género *Bursera* son una fuente importante de copal, también se ha reconocido que la resina aromática de *Protium copal* ha sido empleada como incienso desde tiempos prehispánicos, formando parte de ceremonias religiosas y tratamientos medicinales (Merali *et al.*, 2018; Rzedowski & Calderón de Rzedowski, 1996). El listado de las especies de las que se obtiene el copal, sus nombres comunes, así como su distribución geográfica, pueden consultarse en el Anexo. En la siguiente figura se observan algunos de los ejemplares mencionados anteriormente.

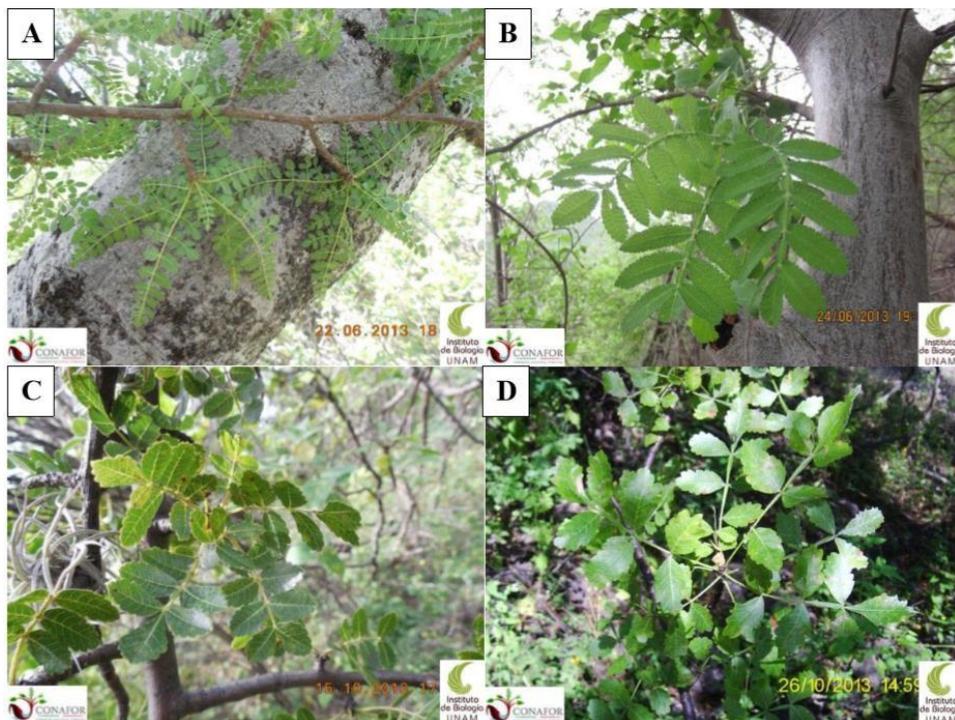


Fig. 2. Ejemplares del género *Bursera*. **A.** *B. bipinnata* **B.** *B. copallifera* **C.** *B. glabrifolia* **D.** *B. linanoe*. Fotografías tomadas de Irekani, Instituto de Biología, UNAM, 2016.

1.3 Canales resiníferos en la familia Burseraceae

Los tejidos de secreción son comunes en la mayoría de las plantas vasculares, existiendo variantes dependiendo de su estructura, posición anatómica y la sustancia que secretan. Algunas de dichas sustancias corresponden a compuestos suministrados de manera directa o indirecta por los tejidos vasculares, es decir, el xilema y el floema (Fahn, 1988); el primero, especializado en el transporte de agua y solutos desde las raíces, y el segundo, en el transporte de metabolitos desde las hojas al resto de la planta (Zlotnik & Ponce, 2013).

En el caso de varias especies de la familia Burseraceae, la presencia de canales resiníferos (que secretan resina) se encuentran asociados al floema (Metcalfé & Chalk, 1950). De hecho, en un trabajo de Serrano-Rosas (2018) donde analizó la anatomía del sistema vascular del hipocótilo en diferentes especies de *Bursera* se observó que, desde las primeras semanas de desarrollo de las plántulas, cada haz vascular del estele (de tipo eustele) se encontraba asociado a un canal resinífero (Fig. 3).

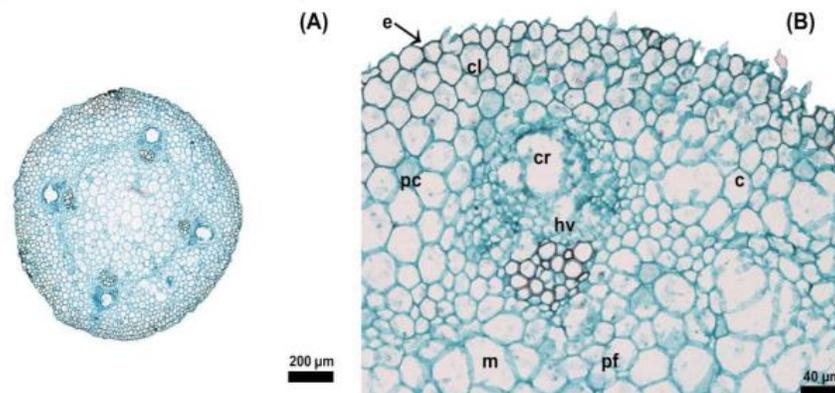


Fig. 3. Corte transversal de hipocótilo de *Bursera biflora*. A. A los 15 días de emergencia de la radícula; **B.** Detalle de los tejidos en el mismo corte. **Abreviaciones:** canal resinífero (cr), córtex (c), colénquima lagunar (cl), epidermis (e), haz vascular (hv), médula (m), parénquima clorofiliano (pc), parénquima fundamental (pf).

Fotomicrografías en campo claro. Tinción safranina-verde rápido. Adaptado de Serrano-Rosas, 2018.

Por otra parte, se ha descrito de manera genérica que los canales secretores de las plantas se encuentran conformados por varias capas de células donde la más interna (el epitelio), se mantiene más activa durante el proceso de secreción, mientras que la más externa se encuentra formando una especie de vaina protectora, gracias a que sus células presentan paredes más gruesas (Fahn, 1988; Souza *et al.*, 2015). Es en el trabajo realizado por Palermo y colaboradores (2018), utilizando plantas adultas de 7 m de alto y con un tallo de entre 20 y 25 cm de diámetro a la altura del pecho, realizaron

la caracterización histológica de una especie de la familia Burseraceae, *Protium heptaphyllum*, donde se pueden apreciar dichas estructuras (Fig. 4A).

Palermo y colaboradores (2018) también describen que conforme los canales se iban distanciando del cambium vascular, las células epiteliales de éstos mostraban una lignificación progresiva de sus paredes, de tal suerte que, aquellas que se encontraban cercanas al cambium, sólo presentaban la pared primaria de material pecto-celulósico (pectinas, celulosa, hemicelulosa y proteínas), mientras que, en la parte más externa del floema secundario, los canales se conformaban por células epiteliales esclerificadas, mostrando un lumen más angosto y paredes lignificadas más gruesas (Fig. 4B, 4C); características que denotan que han perdido su capacidad secretora (Langenheim, 2003).

Así pues, se ha descrito en varias especies de la familia Burseraceae que su sistema secretor de resina está conformado por canales que crecen longitudinalmente, que se ramifican lateralmente, y donde se presenta fusión de canales adyacentes, es decir, los canales resiníferos se extienden a lo largo del tronco formando una red. De hecho, se ha propuesto que la anastomosis de dichos canales facilita el transporte de la resina hacia diferentes direcciones, de tal manera que funciona como un sistema de drenado en caso de presentarse una herida, asegurando una protección más efectiva contra agentes patógenos y herbívoros (Ghosh & Purkayastha, 1960; Palermo *et al.*, 2018; Tolera *et al.*, 2013).

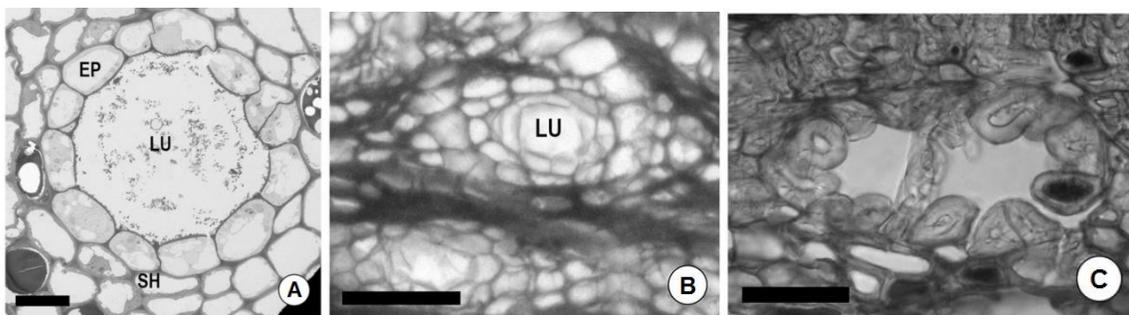


Fig. 4. Corte transversal del tallo de *Protium heptaphyllum*. A. Canal secretor B. Canal secretor en la región interna del floema secundario, con células epiteliales de pared delgada; C. Canal secretor en la zona más externa del floema secundario, constituido por células epiteliales esclerificadas, y células lignificadas en la vaina. Abreviaciones: EP= epitelio secretor; LU= lumen; SH= parénquima formando una vaina. Adaptado de Palermo *et al.*, 2018.

Capítulo II. El copal, perspectivas culturales

En este capítulo se busca familiarizar al lector con el copal, uno de los componentes culturales de nuestro país que ha trascendido a lo largo del tiempo, reconociendo su importancia en la cosmovisión de la sociedad mexicana, así como su potencial para futuras investigaciones de índole científico.

2.1 Colecta del copal

La Cuenca del Río Balsas es una región donde se ha presentado la concentración máxima de especies del género *Bursera* (Miranda, 1947), esta región está delimitada al norte por el Eje Neo-volcánico Transversal (como también se le conoce al Cinturón Trans-volcánico mexicano), desde el cerro de La Malinche hasta el límite de los estados de Jalisco y Michoacán; por el este con la Sierra Madre de Oaxaca y, por el sur y el oeste, con la Sierra Madre del Sur. Comprende porciones de los estados de Guerrero, Jalisco, la Ciudad de México, Michoacán, Oaxaca, Puebla y Tlaxcala, así como la totalidad del estado de Morelos. Para su manejo, la cuenca se ha dividido en tres regiones, denominadas como Alto Balsas, Medio Balsas y Bajo Balsas (Fernández *et al.*, 1998).

Es una zona donde se ha registrado un gran aprovechamiento de las especies de *Bursera* a lo largo de la historia (Hersch & Sierra, 2008; Montúfar, 2004; 2012). De acuerdo con los registros arqueológicos con los que se cuentan, se ha descrito que la técnica contemporánea de resinación o colecta del copal en la cuenca del Alto Balsas (parte de los estados de Guerrero, Oaxaca, Puebla, Tlaxcala y todo el estado de Morelos) es muy similar a la que se practicaba en tiempos prehispánicos (Fernández *et al.*, 1998; Montúfar, 2004). Dependiendo del poblado que se esté estudiando, puede haber variaciones en la técnica para colectar la resina y los instrumentos que se utilizan.

En general, se ha descrito que la cosecha del copal se realiza durante la época de lluvias, cuando se seleccionan los árboles y las ramas de éstos, a partir de las cuales se obtendrá la resina. Se hacen cortes de aproximadamente 3 a 5 mm de profundidad sobre la corteza de las ramas más gruesas del árbol, de tal manera que la resina emane y ésta pueda ser colectada en recipientes que son atados por debajo de la zona donde se hicieron las incisiones. Tradicionalmente se ocupan pencas de maguey para tal fin, aunque también se recurre a botellas de plástico (CONABIO, 2008; Montúfar, 2015; Purata & León, 2005; Purata & León, 2008).

Montúfar (2012), describe que en el área de Jolalpan, Puebla, los copaleros realizan una primera incisión, en sentido longitudinal a las ramas (o al tronco) con una quichala (una pequeña

cuchilla de fierro), y le insertan una hoja de encino (*Quercus glaucoides* Mart. et Gal.). Los siguientes cortes (de 15 a 25 cm de longitud) se realizarán a manera de abanico alrededor del primero, de tal suerte que la resina fluya hacia la hoja de encino, y ésta pueda dirigirla hacia la penca de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.), colgada previamente a 10-15 cm de distancia por debajo de la primera incisión, y sellada con una pasta hecha con ceniza, agua y boñiga.

Así pues, menciona que cada tercer día se hacen nuevas incisiones y se limpia la resina colectada en la penca, retirando las impurezas que se hayan podido depositar en ella, como hojas o ramas pequeñas. Una vez que la penca se ha llenado, se retira y se cambia por una vacía para continuar con la extracción, hasta que se agote la secreción de cada rama. De tal suerte que, dependiendo del estado físico del árbol, los copaleros llegan a requerir de uno a cinco pares de pencas por individuo. En cuanto a las pencas con copal, se les retira la resina para que ésta pueda ser empacada y transportada para su venta en Tzicatlán, Puebla.

Otro ejemplo de la técnica de colecta del copal es descrito por Purata & León (2008) para el poblado de San Miguel Maninaltepec, Oaxaca. Los lugareños describen que la selección del árbol se realiza dependiendo del tamaño del mismo. El tamaño mínimo se determina de acuerdo con el grosor de su tronco, que debe ser de aproximadamente 30 cm de diámetro, a 1.3 m de distancia del suelo, lo que previene la explotación de árboles jóvenes. La forma en la que extraen el copal en dicha comunidad es muy similar a la descrita por Montúfar (2012) para Jolalpan, Puebla, sin embargo, presentan algunas diferencias que merecen ser mencionadas.

En esta comunidad oaxaqueña, la primera serie de cortes (realizados en forma de “V” abierta) se realizan en el tronco a 30 cm del suelo, aproximadamente. Los cortes se deben realizar de manera ordenada y su profundidad debe ser de apenas unos milímetros pues de ello depende la correcta cicatrización de los mismos, de lo contrario, se correrá el riesgo de que los árboles sean infectados por hongos o parásitos que los debiliten. Las incisiones, de 9 a 11 cm de largo, se realizan cada tercer día y su número depende la cantidad de resina que produzca el árbol, llegando a haber periodos de extracción de entre 25 y 30 días (Purata & León, 2008).

Una vez que los colectores notan que la cantidad de resina que emana de las incisiones disminuye considerablemente, dejan de hacer cortes y, la resina colectada (en este caso en latas o en botellas de plástico recortadas a lo largo, Fig. 5), se saca del recipiente, almacenándose para su posterior transporte al centro de acopio. Cabe señalar que en San Miguel Maninaltepec también practican el desprendimiento de la corteza en la que se queda adherida algo de la resina (Purata &

León, 2008). Recordemos que, a diferencia de los copaleros de Jolalpan, Puebla, los de Maninaltepec no utilizan una hoja de encino que guíe el flujo de la resina al contenedor y que evite que ésta fluya por la corteza.



Fig. 5. Colecta de la resina de copal. Para realizar los cortes en “V” sobre el tronco del ejemplar de *Burseraceae*, se puede hacer uso de un palo de madera para golpear el machete. La resina puede ser colectada en botellas de plástico o en pencas de maguey. Reproducido de Purata & León, 2008.

2.2 El uso del copal en el México prehispánico

El uso que las culturas prehispánicas le daban al copal era muy variado, sin embargo, éste se enfocaba más en los rituales religiosos (Montúfar, 2015; Purata, 2008). Los aztecas consideraban que el humo blanco que desprendía al ser quemado, era el dios blanco *Iztacteteo*, asociado con las lluvias y la fertilidad (CONABIO, 2008; Purata, 2008), además de que se consideraba que dicho humo permitía establecer un vínculo entre los humanos y las divinidades que regían la naturaleza (Montúfar, 2015). Por lo tanto, no es de extrañar que antes de la llegada de los españoles, el copal ya fuera utilizado en la mayor parte de las ceremonias del México mesoamericano.

La resina era colocada en sahumerios conocidos como *tlemaitl* (“manos de fuego”), donde eran quemados para limpiar, es decir, sahumar los templos. También se ofrecía para pedir por las lluvias y las cosechas, ya que creían que el copal calentaba el aire, lo que prevenía las heladas, a la vez que su humo atraía las nubes que generaban la lluvia; así como para pedir por la salud o por el éxito en las batallas (García, 2015). Como parte de las ofrendas, se moldeaban pequeñas figuras de distintas formas, algunas antropomorfas, esféricas, cónicas, o de algún alimento como granos de maíz o tortillas, que eran dedicadas a los *tlaloque* (ministros de la lluvia), u otras deidades. Además, en

cada veintena, es decir, en cada mes del calendario mexicana, se dedicaban fiestas para una o varias deidades, las cuales requerían del uso de copal (Montúfar, 2012; 2015; Purata, 2008).

Sin embargo, el copal también tenía una aplicación medicinal pues, con la resina se trataban las picaduras de alacrán, el dolor de muelas, se hacían infusiones para aliviar enfermedades respiratorias, entre otros padecimientos (Purata, 2008). En el arte prehispánico, era utilizado como adhesivo, ya que les permitía pegar incrustaciones a máscaras y mosaicos, pero ésta también podía ser moldeada y pintada para decorar los mismos (Stacey *et al.*, 2006).

Además, era un componente socioeconómico, puesto que, la resina sin quemar era utilizada para rendir tributo a los mexicas, siendo que éstos recibían cada 80 días más de 1,600 pellas de copal, que eran puños de resina envueltos en hojas de maíz secas, conocidas como *totomoxtle* (CONABIO, 2008). Por lo tanto, vemos cómo es que el copal era un fuerte componente en la cultura prehispánica, y posiblemente, de manera preponderante en las peticiones para el sustento y los éxitos militares, ya que la agricultura y la tributación sustentaban la economía de las sociedades.

2.3 Usos actuales del copal en México

En la actualidad, se conservan algunos de los usos tradicionales del copal, sobre todo cuando éste se aprovecha como incienso, tal es el caso de los rituales donde se emplea para pedir por las lluvias y agradecer por las cosechas, en las limpiezas y la adivinación. Aunque, por supuesto, también vemos su participación en ceremonias religiosas como en los funerales, las celebraciones de Día de Muertos y las misas (Purata, 2008). Lo anterior, denota cómo las concepciones religiosas prehispánicas y católicas se han entrelazado a tal grado que dichas prácticas han persistido a través de la historia de nuestro país, superando distintos cambios económicos, tecnológicos e ideológicos (Montúfar, 2012).

Persiste su uso en la medicina tradicional, teniendo aplicaciones diversas dependiendo del pueblo originario (o la región) que se trate. Como ejemplos tenemos que los nahuas lo consumen pulverizado y disuelto en agua para el tratamiento de la diarrea y, junto con los mayas, lo utilizan para tapar las cavidades en los dientes; en Oaxaca se combina con yemas de huevo y leche para el tratamiento de la neumonía mientras que, en Sinaloa, se aprovecha la resina de *B. bipinnata* para curar heridas. Los nahuas de la Sierra Zongolica del estado de Veracruz, también utilizan la resina de *B. simaruba* para el tratamiento de la fiebre y la varicela; *Protium copal* es utilizado para el tratamiento del asma o infecciones respiratorias, para aliviar dolores abdominales y también, en caso de diarrea (Case *et al.*, 2003).

En el ámbito artístico, se tiene que en Oaxaca existe una larga tradición de fabricación de alebrijes de madera, sin embargo, la utilización de madera de copal para tal fin es de reciente aplicación, siendo las especies *Bursera glabrifolia* (también conocido como copalillo o copal hembra), *B. submoniliformis* y *B. linanoe*, las más utilizadas (Purata *et al.*, 2005). En Olinalá, Guerrero, elaboran las típicas cajas de madera calada de linaloe a partir de la madera de *Bursera linanoe*; de hecho, su aceite esencial ha sido aprovechado por las industrias perfumeras y también para aromatizar artesanías de madera de pino (CONABIO, 2008; Hersch, 2005). Adicionalmente, la resina de copal ha sido útil en la elaboración de barnices, tintes, impermeabilizantes para embarcaciones y repelentes de insectos (Quiroz & Magaña, 2015).

En el ámbito científico, se han realizado investigaciones sobre los efectos farmacológicos del copal, demostrándose que no sólo los extractos del tallo y las hojas de *Bursera copallifera* (“copal ancho”) tienen propiedades antiinflamatorias (Columba-Palomares *et al.*, 2015), sino que también la resina presenta esta propiedad, gracias a la acción de los triterpenos que la conforman (Romero-Estrada *et al.*, 2016). Por otro lado, se ha demostrado que el incienso que desprende *Protium copal* reduce el comportamiento ansioso en ratones sometidos a pruebas de interacción social y de respuesta emocional condicionada; lo cual fue asociado a la notable presencia de α - y β -amirinas (Merali *et al.*, 2018).

Capítulo III. Química de las resinas

Como se comentó en el primer capítulo, la familia Burseraceae pertenece a un grupo de plantas diverso que presenta la capacidad de producir resinas (CONABIO, 2008). Dichos exudados, independientemente de su origen botánico, comparten la característica de ser sustancias liposolubles conformadas por dos fracciones, una fracción volátil, que corresponde al aceite esencial y que contiene compuestos de bajo peso molecular, y la no volátil, la resina en sentido estricto con compuestos de mayor masa molecular (Fahn, 1988; Rasgado, 2014).

Así pues, en ellas es característica la presencia de metabolitos secundarios, compuestos orgánicos de origen vegetal que se encuentran en bajas concentraciones en los tejidos de las plantas, de tal suerte que, a diferencia de las proteínas, los lípidos y carbohidratos, éstos no forman parte de los nutrientes prioritarios (metabolitos primarios). Más bien, funcionan como intermediarios en las relaciones ecológicas de las plantas que los producen, es decir, determinan la interacción de éstas con los demás organismos que conforman su medio ambiente. Adicionalmente, algunos tienen importancia fisiológica o sirven como señales en la diferenciación y el metabolismo celular (Azcón-Bieto & Talón, 2013; Fraenkel, 1959; Leonhardt *et al.*, 2011).

3.1 Composición química de las resinas

Las resinas ejercen su función protectora contra agentes patógenos debido a que en ellas se concentran metabolitos secundarios, específicamente los terpenos y/o los compuestos fenólicos. Los primeros son hidrocarburos aromáticos producidos a partir de la ruta del Ácido Mevalónico, mientras que los segundos, se distinguen por presentar uno o varios grupos hidroxilo unidos a un anillo de benceno, derivándose de la ruta del Ácido Shikímico (Azcón-Bieto & Talón, 2013; Rasgado, 2014).

La estructura base de los terpenos es el isopentenil difosfato (IpPP) de cinco carbonos, y se clasifican de acuerdo con el número de unidades de IpPP que los conforman. En cuanto a los fenoles, el compuesto básico es el fenol de seis carbonos. La mayoría de estos compuestos son polifenoles, dentro de los cuales se encuentran las cumarinas, los flavonoides y los lignanos, siendo estos últimos componentes usuales de las resinas (Azcón-Bieto & Talón, 2013).

La fracción volátil de las resinas se compone principalmente por mono- y sesquiterpenoides, mientras que los di- y/o triterpenoides son los que constituyen la fracción no volátil (Langenheim, 2003), siendo los triterpenoides los compuestos predominantes en la fracción no volátil en la familia

Burseraceae (Lucero-Gómez *et al.*, 2014a). Así pues, el copal se ha definido químicamente como una mezcla de compuestos orgánicos, liposolubles, con una densidad entre 1.045-1.139 kg/m³ y un elevado punto de fusión (Quiroz & Magaña, 2015).

Algunas consideraciones sobre los terpenos que se han reportado en el copal son las siguientes:

- Monoterpenos (con 2 unidades IpPP, 10 carbonos): derivados del geranil difosfato (GPP) que es sintetizado en los cloroplastos, son los componentes principales de los aceites esenciales. De acuerdo con su estructura, se distinguen aquellos que son acíclicos, monocíclicos y bicíclicos, pudiendo presentar insaturaciones y grupos funcionales (hidroxilos, cetonas y aldehídos, principalmente) (Azcón-Bieto & Talón, 2013; Gigliarelli *et al.*, 2015; Quiroz & Magaña, 2015).
- Sesquiterpenos (3 unidades IpPP, 15 carbonos): tienen como precursor al farnesil difosfato (FPP), cuya síntesis es catalizada en el retículo endoplásmico. Al igual que los monoterpenos, son compuestos volátiles que pueden o no presentar insaturaciones, y su estructura es variada (desde acíclica hasta tricíclica). También pueden presentar grupos funcionales como hidroxilos, cetonas y carboxilos (Azcón-Bieto & Talón, 2013; Gigliarelli *et al.*, 2015).
- Triterpenos (6 unidades IpPP, 30 carbonos): sintetizados en el citoplasma a partir del escualeno, se encuentran en la fracción no volátil del copal. Su estructura es de tipo tetracíclica o pentacíclica. Los de tipo lupano son característicos de las resinas de *Bursera*, aunque también llegan a presentarse los de tipo ursano y oleanano (Azcón-Bieto & Talón, 2013; Díaz, 2016; Gigliarelli *et al.*, 2015).

Así pues, el copal (al igual que otras resinas vegetales) es una sustancia de alta viscosidad que, al estar expuesta al ambiente durante largos periodos de tiempo, tiende a perder sus componentes mono- y sesquiterpenoides, dejando a los triterpenos, que perduran en el exudado por un mayor tiempo. Dentro de este último grupo se distingue a aquellos con esqueleto de dammarano y el lanostano, ambos tetracíclicos; además, están el ursano, oleanano, lupano y hopano, todos pentacíclicos (Colombini & Modugno, 2009).

En un estudio realizado por De la Cruz-Cañizares y colaboradores (2005) se reporta la composición química de una muestra de copal contemporáneo obtenido a partir de *Bursera cuneata*, cuya porción monoterpénica se componía principalmente de α -pineno, *o*-cimeno, sabinol y 4-

terpineol; mientras que la sesquiterpénica presentaba acetato de fenquilo, *cis*-calameno e isoleveno. En cuanto a la fracción triterpénica, los compuestos más abundantes fueron hop-22(29)-en-3-ol, α -amirina y β -amirina. Estos últimos dos compuestos, también han sido reportados como componentes importantes de la resina de *Protium heptaphyllum* y *P. copal* (Merali *et al.*, 2018; Stacey *et al.*, 2006).

Para el caso de *Bursera bipinnata*, los compuestos 3-*epi*-lupeol, α -amirina y 3-*epi*- α -amirina, han sido reportados como los triterpenos más abundantes en su resina (Lucero-Gómez *et al.*, 2014b). Caso similar para el copal obtenido de *B. copallifera* y *B. simaruba* donde, los dos primeros compuestos antes mencionados, también han mostrado una abundancia predominante (Romero-Estrada *et al.*, 2016; Lucero-Gómez *et al.*, 2014b). En otras especies de la familia Burseraceae como *B. excelsa*, *B. grandifolia*, *B. simaruba* y *B. penicillata*, también se han destacado los triterpenos: 3-*epi*- β -amirina, β -amirina, α -amirina, lupenona (Lucero-Gómez *et al.*, 2014b).

La estructura de algunos de los compuestos anteriormente descritos se muestra en la Fig. 6. Es importante recordar que el copal ha sido y es extraído de diferentes especies árboles dentro de la familia Burseraceae, por lo que su composición química podría diferir entre ellas (Leonhardt *et al.*, 2011), aunque como se ha visto, pueden tener algunos compuestos en común (Lucero-Gómez *et al.*, 2014a). Además, hay que tomar en cuenta que, factores como el estado de desarrollo de la planta, o si ésta ha sido atacada por algún herbívoro, influyen en el perfil químico de la misma (Fahn, 1988; Leonhardt *et al.*, 2011; Rasgado, 2014).

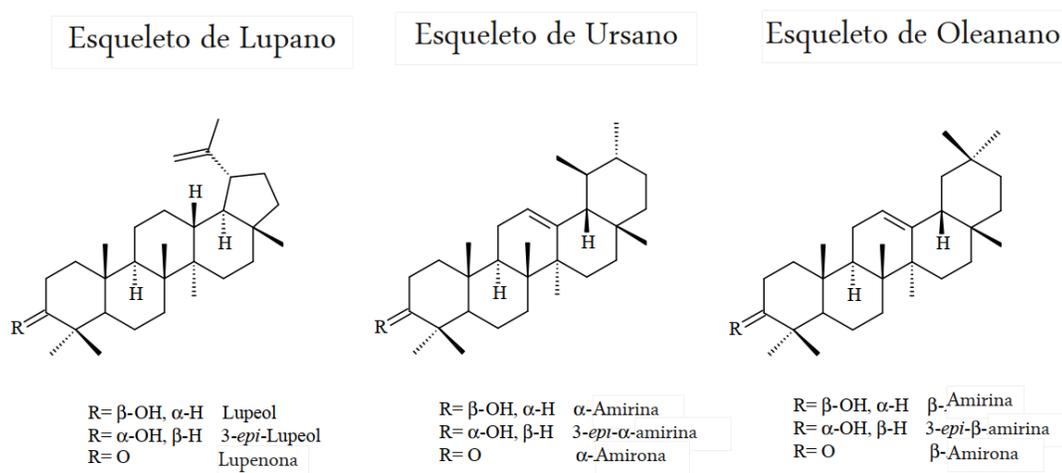


Fig. 6. Triterpenos reportados en algunas especies del género *Bursera*. Adaptado de Gigliarelli *et al.*, 2015.

3.2 Los biomarcadores arqueológicos

Los estudios biomoleculares de residuos orgánicos en muestras arqueológicas comenzaron a manifestarse desde la década de los setentas del siglo pasado, llegando a tener mayor popularidad en la década de los noventas. A partir de ello, se definió el concepto de *biomarcadores arqueológicos*, sustancias presentes en los residuos orgánicos que permiten obtener información sobre las actividades humanas en el pasado (Evershed, 2008). De tal suerte que los biomarcadores pueden ser cualquier tipo de biomolécula (DNA, lípidos, proteínas, carbohidratos o pigmentos, por mencionar algunos), que permita definir su origen (Evershed, 2008; Grice *et al.*, 2019).

Así pues, el uso de biomarcadores *arqueológicos* pretende encontrar una relación entre las “huellas químicas” y las mezclas o compuestos que se pueden asociar a organismos que pudieron haber sido aprovechados en el pasado (Evershed, 1993). Claro está que la aplicación de biomarcadores en la investigación de residuos orgánicos, requiere del empleo de técnicas especializadas que permitan su detección, así como la posible identificación de aquellos que sean característicos de ciertos géneros o especies de plantas (Hayek *et al.*, 1990; Regert, 2004; Regert *et al.*, 2005; Roffet-Salque *et al.*, 2017).

En el caso de las resinas, las moléculas que se han empleado como biomarcadores son los terpenos, particularmente los sesqui-, di- y triterpenos; éstos han permitido identificar la familia botánica de la que provienen y, en algunos casos, el género, lo que ha permitido delimitar su origen geográfico. Aunque para resinas arqueológicas, se prefieren los diterpenos y triterpenos (Roffet-Salque *et al.*, 2017). Así pues, los biomarcadores permiten asociar el origen botánico de la resina, las modificaciones que los compuestos pudieron tener tras el tratamiento que le daban los humanos para modificar sus propiedades para algún uso específico, así como la transformación natural de los mismos debidas a causas ambientales o a su envejecimiento (Modugno & Ribechini, 2009).

Capítulo IV. Técnicas de química analítica en el análisis de muestras arqueológicas

En química analítica, las técnicas instrumentales se basan en la medición de una propiedad física del material bajo estudio, como lo es la eléctrica o la de absorción de radiación electromagnética. Dentro de estas técnicas se pueden citar a la radioquímica, la espectrometría de resonancia magnética nuclear (RMN o NMR, por sus siglas en inglés), la espectrometría de masas, la espectrometría atómica, la espectrofotometría (ultravioleta, visible o infrarroja) y la cromatografía (de gases o líquidos) (Christian, 2009).

En el estudio de resinas arqueológicas, la cromatografía de gases acoplada a la espectrometría de masas ha sido una técnica ampliamente utilizada (Colombini *et al.*, 2005; Díaz, 2016; Duce *et al.*, 2015; Lucero-Gómez *et al.*, 2014b; Modugno *et al.*, 2006; Stacey *et al.*, 2006), ya que ha demostrado ser una técnica adecuada para el análisis de mezclas complejas (Font *et al.*, 2007). Por otra parte, la espectrometría en el infrarrojo es una herramienta ventajosa pues, al ser una técnica no destructiva se ha recurrido a ella para la caracterización química de artefactos arqueológicos, históricos y artísticos (Daher & Bellot-Gurlet, 2013; Glavcheva *et al.*, 2014), llegando inclusive a ser utilizada en el análisis de resinas fósiles (Rodríguez, 2013).

4.1 Cromatografía de gases con acoplamiento a espectrometría de masas (CG-EM)

La cromatografía de gases (CG) es una técnica de separación de reparto, es decir, comprende a un líquido como su fase estacionaria (f.e.), mientras que su fase móvil corresponde a un gas inerte (helio, nitrógeno o hidrógeno), de tal suerte que se lleva a cabo la repartición de los analitos entre las dos fases (Díaz, 2016; Stashenko & Martínez, 2010a). El líquido de la f.e. no debe ser volátil y debe estar sostenido en una pared capilar con partículas sólidas inertes, como la tierra de diatomeas en las columnas empacadas. Es una técnica versátil que es muy utilizada para la identificación de compuestos orgánicos (Christian, 2009).

Su funcionamiento se basa en la volatilización de la muestra, la cual es introducida con una micro-jeringa a un puerto de inyección calentado a cierta temperatura, para después dar paso a la separación de sus componentes en la columna y su posterior detección (Christian, 2009; Díaz, 2016). De tal manera que los compuestos volátiles o potencialmente volatilizables, termoestables (hasta 350 °C, aprox.) y con una masa molecular relativamente baja (340 – 400 *u*), son aptos para el análisis por CG. Sin embargo, a través de procesos de derivatización, se puede incrementar la volatilidad y

termoestabilidad de diferentes sustancias, mejorando la separación cromatográfica de los analitos (Stashenko & Martínez, 2010a).

El equipo cromatográfico está constituido por cuatro bloques fundamentales: el inyector (introduce la muestra cuantitativamente), la columna (recibe la muestra para separar sus componentes), el sistema de detección (diferencia las moléculas del analito de las de la fase móvil y mide las propiedades físicas del gas portador o de arrastre, las cuales se modifican ante la presencia de los analitos), y el sistema de datos (permite seleccionar los parámetros de la cromatografía, adquiere, amplía y mide la señal detectada, para poder almacenar los datos) (Díaz, 2016; Stashenko & Martínez, 2009). Así como en el puerto de inyección, el sistema de detección debe mantener una temperatura mayor a la de la columna, de tal manera que la muestra no se condense en el detector (Christian, 2009).

Al seleccionar una columna, se deben considerar algunas características de la muestra, como lo son: solubilidad, polaridad o su capacidad adsorbente, para identificar la polaridad de la fase estacionaria que se requiere emplear en el análisis. En CG existen dos tipos de columnas: empacadas y capilares. Las primeras, son columnas de vidrio, acero inoxidable o teflón, que suelen contener partículas recubiertas con la fase líquida de polaridad variable. Mientras que las segundas son fabricadas con sílice fundida (SiO_2), a la que se adhiere la f.e., y que se recubren externamente con un polímero de poliimida que brinda soporte y protección a la columna (Christian, 2009). Las fases estacionarias más utilizadas en CG capilar son las que presentan polímeros de tipo siloxanos sustituidos (ofreciendo un amplio rango de polaridades), y los de tipo poli (etilenglicoles) (PEG), fases altamente polares (Stashenko & Martínez, 2010a).

Las columnas capilares son las más utilizadas, dada su alta resolución, los tiempos de análisis cortos y su alta sensibilidad. En ellas, la fase estacionaria, debe permitir la solubilidad de los analitos, mientras que la interacción entre éstos y el gas de arrastre (He o H_2) debe ser mínima. Para este tipo de columnas, se consideran principalmente dos tipos de inyectores: de vaporización en modo *split* (se desecha parte de la muestra) o *splitless* (sin división de la muestra), y los inyectores *on-column*, donde la muestra líquida es inyectada directamente en la columna sin ser vaporizada previamente. Para seleccionar el modo de inyección no sólo se debe de tomar en cuenta las características químicas de los analitos y el tipo de columna a emplear, sino también el objetivo del análisis, si será cuantitativo, cualitativo, o si se desea detectar trazas, por mencionar algunos casos (Stashenko & Martínez, 2010a).

Como se mencionó en párrafos anteriores, el sistema de detección se basa en la medición de alguna propiedad física del sistema (corriente iónica, conductividad térmica, emisión fotónica, entre otras), de tal suerte que existen diferentes clasificaciones para los distintos tipos de detectores que existen para CG. Una de ellas los distingue de acuerdo a la selectividad de la respuesta, teniendo: universales (generan una respuesta a todos los componentes eluidos), selectivos (de acuerdo con alguna propiedad de los analitos, como la presencia de ciertos átomos o aspectos estructurales), y los específicos (responden a un compuesto en particular, son altamente selectivos) (Stashenko & Martínez, 2009; Stashenko & Martínez, 2010a).

Dentro de todos los factores que intervienen en la elución de los componentes de una muestra a través de la columna cromatográfica, los principales corresponden a las propiedades químicas del analito, el tipo de fases que se seleccionen (móvil y estacionaria), y la afinidad de los compuestos por la f.e., manifestándose a través de diferentes interacciones como enlaces de hidrógeno, interacciones entre dipolos, fuerzas de inducción, o interacciones mixtas, que implican dipolos inducidos (Christian, 2009; Stashenko & Martínez, 2010a). De tal manera que, a través del sistema de datos y con las señales identificadas por el detector, se obtiene un cromatograma que permite cuantificar los analitos (Stashenko & Martínez, 2010a; Stashenko & Martínez, 2010b).

Cada analito presenta una *constante de distribución* (K_D) específica, la cual describe su repartición entre las dos fases y, por lo tanto, su afinidad por cada una de ellas. De tal manera que a través de la K_D también se definen los *tiempos de retención* (t_R), es decir, los minutos que tardan los solutos en atravesar todo el sistema cromatográfico. La comparación de los t_R experimentales con los de estándares certificados, permite hacer una identificación presuntiva de los compuestos, ya que los t_R no son exclusivos. Para realizar una identificación más certera se suele combinar la CG con la espectrometría de masas, conformando un *sistema gases-masa* (Fig. 7) (Christian, 2009; Skoog *et al.*, 2018; Stashenko & Martínez, 2009).

La espectrometría de masas (EM) se basa en la producción de iones en fase gaseosa y en su separación de acuerdo con la relación masa/carga (m/z) que presenten, reconociendo la abundancia de cada una de las especies iónicas. Sus componentes fundamentales son el sistema de introducción de la muestra, una fuente de iones, un sistema de aceleración y de extracción de iones, el analizador de masas, y finalmente, el sistema de colección, amplificación y registro de iones, el cual convierte la corriente eléctrica de cada ion en una señal gráfica, cuya intensidad indica la abundancia del ion-fragmento (Giorgi, 2009; Skoog *et al.*, 2018; Stashenko & Martínez, 2010b).

Existen diferentes fuentes de ionización, pero la que se utiliza con mayor frecuencia es el Impacto Electrónico (EI), donde un filamento de tungsteno genera electrones de alta energía (70 eV), los cuales inciden en las moléculas de la muestra, fragmentándolas y produciendo iones en diferentes estados de energía. En cuanto al analizador de masas, el más utilizado es el Filtro de Masas Cuadripolar, el cual consiste en cuatro varillas metálicas paralelas a las que se les aplican diferentes voltajes, lo que interfiere en la trayectoria de los iones. De acuerdo con el voltaje aplicado serán los iones que, debido a su relación m/z , logren llegar al detector; aquellos iones que no hayan sido colectados pueden ser recuperados al variar el voltaje (Christian, 2009).

Puesto que la fragmentación de las moléculas que conforman la muestra puede producir iones con masas diferentes, éstos se ven expresados como perfiles de fragmentación, también conocidos como espectros de masas. Dichos espectros reflejan la estabilidad de los iones formados de acuerdo con la intensidad de las señales (picos), dos de las cuales son característicos de todos los espectros, uno corresponde a la especie iónica más estable y, por lo tanto, con mayor probabilidad de ser detectada (el *pico base*), mientras que la segunda señal indica al ion con mayor masa, es decir, aquel que representa a la molécula original con un electrón menos (el *ion molecular*) (Skoog *et al.*, 2018). Por lo tanto, la identificación de cada compuesto se realiza en función de su peso fórmula y su patrón de fragmentación, el cual también es comparado con el de una sustancia patrón (Stashenko & Martínez, 2009).



Fig. 7. Cromatógrafo de gases acoplado a un espectrómetro de masas Agilent Technologies 7890 B-5977 A.
Fotografía cortesía del LANCIC.

4.1.1 Métodos de extracción para muestras de resinas

El análisis de residuos orgánicos que se conservaron en piezas arqueológicas, ofrece información valiosa sobre el uso que le daban las civilizaciones antiguas a dichas piezas o, sobre los componentes que emplearon para su fabricación (como en el caso de las artesanías). Como se comentó anteriormente, esto se debe a la posible presencia de biomarcadores, sin embargo, se debe considerar que dichos residuos son susceptibles a perderse o contaminarse, por lo que resulta fundamental la adecuada obtención de las muestras, de tal manera que se logre preservar la mayor cantidad de la información que dichas piezas puedan contener (Grice *et al.*, 2019; Roffet-Salque *et al.*, 2017).

Así pues, el paso clave para la preparación de las muestras consiste básicamente en la extracción de los analitos, para lo cual, se debe tomar en cuenta su pureza y las características fisicoquímicas que los definan (Colombini & Modugno, 2009). Considerando aspectos fisicoquímicos, es posible lograr la separación de los componentes de una mezcla mediante procesos de equilibrio, es decir, aquellos que involucran la distribución de las sustancias entre dos fases, pudiendo ser: gas-líquido, gas-sólido, líquido-líquido o líquido-sólido (Ahuja, 2003).

Para la extracción líquido-sólido de compuestos semivolátiles como los terpenos, se pueden mencionar tres técnicas, la extracción en fase sólida (EFS), la microextracción en fase sólida (MEFS) y la extracción sortiva con barras de agitación magnéticas (ESBA). La primera pretende extraer el analito por completo de la muestra a través de un sorbente; en la segunda no se busca que sea una extracción tan exhaustiva y se emplea una fibra de sílice fundida recubierta con una fase estacionaria, de tal manera que se lleve a cabo la desorción de los analitos aplicando cierta temperatura o con un disolvente orgánico. La ESBA se basa en el equilibrio de partición de los analitos entre la muestra y un sorbente polimérico, lo que permite una extracción más exhaustiva que con la MEFS (Caicedo, 2011; Wells, 2003).

Para el análisis de compuestos liposolubles, como los presentes en las resinas, se ha reportado que la pulverización de 2 a 3 g de la superficie de las piezas es suficiente para poder detectarlos en las muestras. Al realizar la extracción de dichas moléculas se tienen dos opciones, hacer uso de disolventes orgánicos, o la hidrólisis y metilación directa de los lípidos (Craig *et al.*, 2004; Roffet-Salque *et al.*, 2017). Con el objetivo de liberar los compuestos liposolubles contenidos en la matriz de cerámica pulverizada, se suele recurrir a solventes como el cloroformo (CHCl_3) y el metanol (CH_3OH), o a una mezcla de diclorometano (CH_2Cl_2) y metanol. Además, para facilitar la extracción, se puede recurrir a la sonicación (Papakosta *et al.*, 2015).

La sonicación o extracción ultrasónica, como también se le conoce, es una técnica que ha sido aceptada para la extracción de compuestos orgánicos semivolátiles y no volátiles a partir de matrices sólidas. Se basa en la aplicación de vibraciones ultrasónicas que facilitan la interacción entre el solvente y la muestra, incrementando la velocidad de extracción del analito de la matriz. Este es un método relativamente rápido pues su realización toma entre 15 y 30 minutos, requiriendo volúmenes pequeños de solvente (normalmente de pocos mililitros). En este caso, también se suelen utilizar mezclas de solventes orgánicos como los mencionados en el párrafo anterior (Kaluźna -Czaplińska *et al.* 2016; Kou & Mitra, 2003). En el caso de muestras poco concentradas, la extracción por este método requiere ser repetida en una o más ocasiones, sustituyendo el solvente utilizado por uno limpio, conservando la misma proporción. Una vez realizada la extracción, el extracto debe ser centrifugado o filtrado, pero también se debe recurrir a un método de limpieza previo al análisis del mismo (Kou & Mitra, 2003).

Respecto a la conveniencia de algún método o, el disolvente más adecuado en el análisis de muestras de copal, Díaz (2016) describe que la técnica de microextracción en fase sólida (MEFS)-headspace (HS) es una técnica apropiada para el estudio de estas resinas. De acuerdo con dicha técnica, una vez que la muestra es introducida en un vial, éste es sellado para que los componentes volátiles se difundan hacia la fase gaseosa hasta que llegan a un equilibrio entre ésta y la fase de la muestra, la cual puede contener un modificador de matriz que haga más eficiente la reacción (regulando el pH o la fuerza iónica). Así pues, los componentes volátiles de la mezcla son extraídos a partir de la fase gaseosa (headspace), y aquellos que se hayan adsorbido a la fibra de sílice fundida del sistema MEFS son introducidos al cromatógrafo de gases mediante un proceso de desorción térmica. Por otra parte, dicho autor también indica que la extracción de compuestos terpénicos se ve favorecida al utilizar metanol como disolvente, esto en comparación a la mezcla de metanol con cloroformo en una proporción 1:2 % v/v.

4.2 Espectrometría en el infrarrojo-ATR

La radiación empleada en la espectrometría presenta un componente eléctrico y uno magnético, de tal manera que al interactuar con la materia lo hace a través de fotones, paquetes sin masa cuya energía (E) está dada por su frecuencia (ν), es decir, el número de repeticiones por unidad de tiempo que se expresa en ciclos/segundos (Hertz), y la constante de Planck (h), equivalente a 6.62×10^{-34} J, resultando en la siguiente ecuación:

$$E = h\nu$$

Cuando las radiaciones inciden en la materia, las moléculas de ésta pueden absorber la energía de los fotones, provocando transiciones electrónicas. Cabe señalar que, para que se absorba la energía de radiación, es necesario que el fotón tenga suficiente energía para provocar un proceso de excitación dentro de la molécula (Fernández, 2014; Weininger & Stermitz, 1988).

En el caso de la espectrometría en el infrarrojo (IR), se utilizan las longitudes de onda del infrarrojo medio, las cuales tienen un número de onda de 4,000-400 cm^{-1} y una longitud de onda de 2,500-25,000 nm (Hernández, 2019). A través de esta técnica se mide la absorción o emisión de energía radiante originada por la interacción entre la radiación electromagnética y el material en estudio, es decir, se basa en la propiedad de las moléculas de rotar y vibrar a distintas frecuencias, conocidas como modos vibracionales normales (Piqué & Vázquez, 2012).

Existen tres procesos a través de los cuales las moléculas pueden absorber la radiación: la transición rotacional, la vibracional y la eléctrica (Christian, 2009). En el caso de la espectrometría IR, las transiciones que se producen provocan vibraciones en los átomos de las moléculas, específicamente en sus enlaces (Rodríguez, 2013; Stuart, 2004). Puesto que cada enlace absorbe la radiación a una frecuencia distinta, esta técnica permite la identificación de los grupos funcionales que presentan las moléculas (Fernández, 2014; Weininger & Stermitz, 1988).

Las transiciones vibracionales ocurren en la región del infrarrojo medio o fundamental (Christian, 2009), el cual se subdivide en la región de los Grupos Funcionales (de 4,000 cm^{-1} a 1,300 cm^{-1}), y la Región de Huella Dactilar (de 1,300 cm^{-1} a 670 cm^{-1}). Estas dos subregiones se caracterizan porque en la primera, la posición del pico de absorción dependerá del grupo funcional donde incida la radiación mientras que, la segunda dependerá de la estructura molecular completa (Savin, s/f). Es en esta última región donde se presentan las vibraciones derivadas de enlaces simples con carbono, como C-C, C-O y C-N, mientras que, en la región media del espectro infrarrojo, también denominada Región de Frecuencias de Grupo, se encuentran los grupos de dobles y triples enlaces aislados (Hernández, 2019).

Es importante mencionar que en la radiación IR, la ganancia de energía sólo será posible si el momento dipolar (medida cuantitativa de la polaridad) de la molécula en cuestión interacciona con el campo eléctrico de la onda, es decir que, si el momento dipolar de la molécula no cambia a través de

la vibración de sus enlaces (contrayéndose o expandiéndose), no se absorberá la radiación (la energía proveída por los fotones) (Stuart, 2004). Por lo tanto, los enlaces que presentarán una mayor absorción serán aquellos que sean más polares, como es el caso de los hidroxilos (O-H) y carbonilos (C=O) (Fernández, 2014; Weininger & Stermitz, 1988).

Así pues, se distinguen dos tipos de vibración: de tensión (stretching) y de flexión (bending). En el primero, los enlaces entre los átomos se alargan o se acortan, pudiendo ser de manera asimétrica o simétrica. En el segundo caso, no varía la longitud de los enlaces sino el ángulo en el que están dispuestos, de tal manera que dicha variación se puede expresar de cuatro maneras: en tijereo (scissoring), balanceo (rocking), cabeceo (wagging) o torsión (twisting) (Fernández, 2014).

Por lo tanto, de acuerdo con la descripción de Christian (2009), un espectrómetro es un instrumento que descompone la radiación policromática en distintas longitudes de onda. Se encuentra conformado por una fuente de la radiación de interés, un monocromador, una celda para la muestra, un transductor que convierta la energía radiante en eléctrica, y un dispositivo de lectura que permite interpretar lo registrado por el detector (transductor). El monocromador consiste en un sistema de lentes o espejos que enfocan la radiación, y un prisma o una rejilla de difracción que permite dispersar las longitudes de onda que la conforman.

El equipo que se utiliza en la espectrometría IR se basa en principio de Eficacias de Reflexión, de acuerdo con el cual, cada muestra presenta un índice de refracción que varía dependiendo de la frecuencia de luz a la que sea expuesta. Por lo tanto, no se estudia la energía que atraviesa la muestra sino la que es reflejada en la superficie de la misma (Hernández, 2019). Así pues, es mediante una técnica matemática denominada “transformada de Fourier” (FT), que las señales que llegan al detector son convertidas en la computadora a un espectro interpretable. Los patrones en los espectros facilitan la identificación de las moléculas, pues éstos son característicos de cada una de ellas (Thermo Fisher Scientific, 2013a).

Dentro de las técnicas de muestreo para la espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR) se encuentra la Reflexión Total Atenuada (ATR, por sus siglas en inglés), la cual se emplea como complemento de la espectrometría IR (Thermo Fisher Scientific, 2013b). En la ATR, se utiliza un accesorio ópticamente denso que presenta un alto índice de refracción, de tal manera que, cuando se coloque la muestra sobre dicho dispositivo (Fig. 8) y se haga incidir el haz IR, sólo una parte de la radiación será absorbida, mientras que el resto será reflejada y recibida por el detector (Greener *et al.*, 2010; Hernández, 2019). La importancia de esta técnica radica en el hecho de que,

permite examinar muestras sin importar su estado de agregación y sin que se sometan a ninguna preparación previa (Rodríguez, 2013; Hernández, 2019). Lo anterior se debe a que el equipo presenta un cristal de diamante, el cual facilita el análisis tanto de sólidos duros de forma irregular, como de sólidos homogéneos. Se considera ideal para sólidos laminados, triturados y gomas, por mencionar algunos (Hernández, 2019).

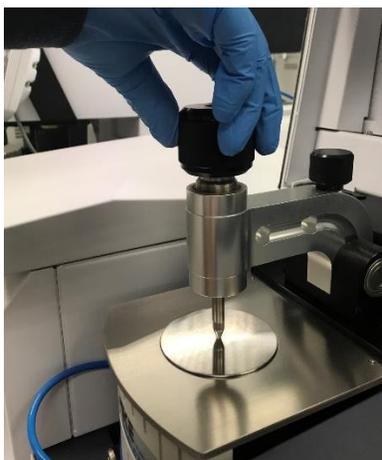


Fig. 8. Módulo ATR del espectrómetro de luz IR. Fotografía cortesía del LANCIC.

4.2.1 El estudio de resinas mediante espectrometría IR

La técnica FT-IR ha sido ampliamente aplicada en el análisis de materiales en el área de la *Herencia Cultural* (Piña-Torres *et al.*, 2017), siendo útil en el monitoreo de la degradación de resinas (Daher & Bellot-Gurlet, 2013; Dietemann *et al.*, 2009), así como en el análisis de residuos orgánicos en piezas de cerámica (Font *et al.*, 2007; Shillito *et al.*, 2009). Dentro de las ventajas de esta técnica se tiene que sus tiempos de análisis son cortos, es más accesible (en comparación con la CG-EM), y requiere poca cantidad de muestra (Font *et al.*, 2007; Glavcheva *et al.*, 2014; Shillito *et al.*, 2009).

Para su aplicación, se ha hecho uso de 1 mg de muestra (Font *et al.*, 2007), de 2 mg (Piña-Torres *et al.*, 2017), o de entre 2.4 a 3.8 mg (Duce *et al.*, 2015). De acuerdo con Shillito *et al.* (2009), los espectros de resinas triterpénicas (como las de los copales) presentan bandas distintivas del enlace C-H entre los 2,922 y 2,852 cm^{-1} , así como la presencia de una banda amplia alrededor de los 3,430 cm^{-1} , indicativo del enlace entre el oxígeno y el hidrógeno del grupo hidroxilo (O-H). También indica que es posible observar la presencia de grupos carbonilo (C=O), contando con una banda entre los 1,730 y 1,710 cm^{-1} , y bandas débiles en la zona de huella dactilar, a 912 y 880 cm^{-1} , correspondientes

a la presencia de alquenos de la forma C=C-H, dados los modos vibracionales de stretching y bending, respectivamente.

A diferencia de las técnicas cromatográficas, la preparación de muestras para el análisis por IR es rápida e implica una menor alteración a las mismas (Shillito *et al.*, 2009). Si bien, para los análisis cromatográficos se recomiendan pretratamientos de purificación, extracción y derivatización de las muestras (las cuales pueden ver modificada su composición original o contaminarse durante el proceso), en el caso de la espectrometría FT-IR, la alteración de las muestras se reduce al consistir en la maceración de las resinas en un mortero ágata con bromuro de potasio (KBr) (Font *et al.*, 2007; Glavcheva *et al.*, 2014; Piña-Torres *et al.*, 2017; Shillito *et al.*, 2009). Aunque también se ha indicado que cuando se trabaja mediante el muestreo de ATR, las muestras se pueden medir de manera directa sobre la superficie del cristal de diamante, lo que brinda la posibilidad de recuperar las muestras (Glavcheva *et al.*, 2014; Font *et al.*, 2007; Salazar, 2013).

Así pues, se ha descrito que el análisis por espectrometría IR permite diferenciar entre compuestos orgánicos de aquellos inorgánicos, por lo que resulta útil en análisis preliminares (Font *et al.*, 2007; Piña-Torres *et al.*, 2017), en este caso, la preselección de muestras arqueológicas que requieran ser analizadas por CG (Shillito *et al.*, 2009). Adicionalmente, se ha resaltado la importancia del uso de bases de datos que cuenten con estándares de piezas arqueológicas o de arte, de tal manera que se haga una adecuada identificación de los materiales (Glavcheva *et al.*, 2014).

Capítulo V. Detección del copal en muestras arqueológicas mediante la CG-EM y FT-IR

Después de haber definido al copal desde una perspectiva biológica y cultural, de haber revisado algunos de los compuestos que pueden estar conformando a este tipo de resina, así como los aspectos generales de dos técnicas comúnmente empleadas en el análisis de residuos orgánicos en piezas arqueológicas; en este capítulo se describen tres trabajos de investigación donde se empleó la CG-EM con el objetivo de determinar la presencia de resina de copal (resinas de la familia Burseraceae) en diferentes piezas halladas en México. Adicionalmente, en uno de estos trabajos se describe la aplicación de la espectrometría en el IR, como un estudio complementario de la cromatografía.

5.1 El copal como adhesivo en mosaicos Aztecas/Mixtecas en el Museo Británico de Londres

En el trabajo de Stacey y colaboradores (2006), se describen los resultados que obtuvieron sobre la caracterización del copal al analizar mosaicos mesoamericanos que datan del siglo XV-XVI, y que fueron adquiridos por el Museo Británico de Londres entre 1860 y 1894, a través de diferentes donadores y que, actualmente, forman parte de la galería que dedican a México. El origen de dichas piezas es clasificado como azteca-mixteca dado que, aparentemente, fueron obtenidas de los Aztecas durante la invasión española, pero podrían ser obra de artesanos mixtecas que las ofrecieron a los mexicas como tributo.

Los mosaicos corresponden a una máscara de madera cubierta con mosaico turquesa (Fig. 9A), una serpiente de dos cabezas que probablemente era usada como pectoral (Fig. 9B), la cabeza de un animal con el hocico abierto e incrustaciones de dientes de tiburón (Fig. 9C), un cráneo cubierto con mosaicos turquesas y de lignito, el cual se cree que puede ser una representación del dios *Tezcatlipoca* (Fig. 9D), un escudo con mosaicos turquesa, de concha y de resina dorada (Fig. 9E). Así como lo que parece ser un casco con dos cuernos, tallado en madera y decorado con mosaicos que forman dos serpientes entrelazadas (Fig. 9F). También, describen la figura de un jaguar que lleva una copa en su espalda, adornado con mosaico turquesa y de conchas (Fig. 9G); un cuchillo que en el mango presenta a un guerrero agachado donde, además de los mosaicos antes mencionados, había teselas de malaquita (Fig. 9H); y una segunda máscara, ésta con dos serpientes entrelazadas (Fig. 9I), posiblemente representando a *Quetzalcoatl* o a *Tlaloc*.

En este trabajo, las muestras arqueológicas fueron comparadas con resinas botánicas de referencia, en las que se incluyeron muestras de diferentes especies de *Pinus* (Pinaceae), *Bursera* y *Protium* (Burseraceae), las cuales fueron seleccionadas de acuerdo con su distribución y su uso

etnográfico. Adicionalmente, se analizaron resinas comerciales obtenidas en mercado de Tepoztlán, México, las cuales fueron reconocidas por sus nombres comunes siendo: copal lágrima, copal negro, copal incienso, copal de piedra y copal blanco, pero no se precisó su fuente botánica.

Todas las muestras fueron analizadas mediante CG-MS. Para ello, se tomaron 2 mg de cada muestra (las de los mosaicos se tomaron a partir de áreas ya dañadas de los mismos), y se sometieron a un proceso de extracción con solventes (1 mL de clorofomo/metanol en una proporción 2:1 v/v) y aplicando calor (55 °C/4 h). A partir de los extractos, se tomaron alícuotas de 50 µL y se secaron bajo corriente de nitrógeno. Posteriormente, se realizó una derivatización con bis(trimetilsilil)trifluoroacetamida (BSTFA) y 1% trimetilclorosilano (TMCS), y fueron inyectadas en modo *splitless* a 250 °C.

Para el análisis cromatográfico se utilizó una columna Agilent HP-5MS con las dimensiones de 30 m x 0.25 mm, 0.25 µm de grosor de la película, helio como gas acarreador, y un gradiente de temperatura para el análisis (proceso isotérmico de 1 min a 35°C, incremento de 10 °C/min, hasta alcanzar 340°C, manteniendo dicha temperatura por 10 min.). En cuanto al análisis mediante EM, la temperatura de la interface fue de 280 °C y la adquisición de datos se hizo mediante el modo scan (50 – 650 uma), con un retraso del solvente (*solvent delay*) de 7.5 minutos. Los datos obtenidos fueron interpretados manualmente con la ayuda de la librería de espectros NIST/EPA/NIH versión 2.0 y comparando con resultados publicados.

De acuerdo con los resultados de Stacey *et al.* (2006), en todas las piezas analizadas se utilizaron resinas como adhesivos para poder sostener los mosaicos, pero de los nueve artefactos, seis presentaron compuestos indicativos de resina de coníferas (Fig. 9A, 9C, 9D, 9E, 9G, 9I), en una se hallaron indicios de resina del género *Bursera* (Fig. 9B), dos presentaron una mezcla de resina de coníferas y de Burseraceae: una con alguna especie del género *Bursera* (Fig. 9F) y otra con *Protium* sp. (Fig. 9H). Cabe señalar que se desconoce si al mezclar las resinas buscaban modificar sus propiedades o si era una decisión basada en la disponibilidad de los recursos (McEwan *et al.*, 2006). En cuanto a las resinas comerciales describen que, de acuerdo con la comparación de los cromatogramas, el copal incienso proviene de una especie de pino, mientras que la composición triterpénica los copales blanco, negro y piedra, tiene una mayor semejanza a las resinas del género *Bursera*.



Fig. 9. Piezas Aztecas/Mixtecas con mosaicos turquesas, expuestos en el Museo Británico de Londres. A. Máscara de madera. B. Serpiente de dos cabezas con mosaico turquesa y concha sobre madera. C. Cabeza de animal con gemas y dientes de tiburón. D. Cráneo con mosaicos turquesa y de lignito. E. Escudo con mosaico turquesa y concha, y resina dorada. F. Casco con cuernos de mosaico sobre madera. G. Jaguar con copa en la espalda, madera tallada con mosaico turquesa y concha. H. Cuchillo con mango de madera tallada en forma de un guerrero águila, cubierto de mosaico turquesa, concha y malaquita. I. Máscara con dos serpientes entrelazadas, cubierta de mosaico turquesa. Fotografías tomadas del banco de imágenes del Museo Británico de Londres, s/f.

5.2 Copal en una ofrenda al norte de Veracruz

En la tesis de licenciatura de A. Díaz (2016), se describe el análisis a muestras arqueológicas provenientes de una ofrenda hallada en una tumba de una ciudad antigua ubicada en la costa norte del estado de Veracruz. Díaz no hizo mayor descripción referente al origen de dichas muestras, pero se menciona que consistían en un cerámico y el contenido del mismo. Aunado a ello, menciona que, dada la calidad decorativa de la pieza, se consideró que ésta podría haber tenido un uso ceremonial y que en su contenido podría hallarse copal. Para confirmar esta hipótesis se realizaron análisis mediante CG-EM, teniendo como resina de referencia copal blanco del estado de Querétaro, México.

En este caso, para el análisis por CG-EM se utilizó una columna capilar (TR-5MS 20 m x 0.18 mm D.I. x 0.18 μ m de espesor de película), helio como gas acarreador, un gradiente de temperatura para el análisis (proceso isotérmico de 2 min a 50 °C, incremento de la temperatura de 5 °C/min, hasta alcanzar 90 °C, manteniendo dicha temperatura 2 min., incremento de la temperatura de 10 °C/min, hasta alcanzar 250 °C de temperatura final, manteniéndola por 2 min.). La temperatura en la línea de transferencia entre el cromatógrafo y el espectrómetro fue de 300 °C. Para este último se consideró una temperatura de 230 °C, una adquisición de datos en modo scan (40-400 m/z), con un retraso del solvente (*solvent delay*) de 3 minutos.

La extracción de la resina de referencia y de las muestras arqueológicas se llevó a cabo mediante una microextracción en fase sólida (MEFS) en modo “headspace”, utilizando una fibra de Polidimetilsiloxano-Divinilbenceno (PDMS/DVB 65 μ m). Cabe señalar que, puesto que otro de sus objetivos era el de desarrollar y optimizar un procedimiento para la extracción, separación e identificación de los terpenos del copal mediante MEFS y CG-EM, primero se evaluó la extracción de 0.5 g de muestra de la resina de referencia con disolventes diferentes: una con 1 mL de metanol, y otra con una mezcla de metanol/cloroformo (1:2 v/v); ambas extracciones se evaluaron por CG/EM y se compararon los resultados.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observó que había una diferencia en el número de compuestos encontrados para cada resina dependiendo del disolvente empleado (14 mediante la extracción con metanol y 10 con metanol/cloroformo). De tal suerte que para la extracción con metanol la mayoría de los compuestos identificados eran terpenos, mientras que con la mezcla metanol/cloroformo se obtuvieron pocos terpenos, así como alcoholes, compuestos clorados y compuestos con grupos carboxilo. Debido a ello, se determinó que el uso de metanol como disolvente de extracción era preferible para continuar con el análisis cromatográfico.

Sin embargo, al aplicar la técnica MEFS-HS con 0.5 mL de la disolución de copal con metanol, se observó que se extraían pocos terpenos. Esto se asoció a que, probablemente, aquellos que no se detectaron eran más afines al metanol, por lo que su concentración en la fase vapor era muy pequeña para ser detectados en el análisis cromatográfico. Así pues, Díaz (2016) consideró que el análisis de las resinas con la técnica MEFS-HS era más apropiada si éstas se encontraban en estado sólido. Para ello, se colocaron 0.05 g de copal blanco (0.02 g de la muestra arqueológica) en un vial de reacción de 1 mL, se llevó a cabo la extracción por MEFS-HS considerando como condiciones óptimas una temperatura de extracción de 60 °C y un tiempo de extracción de 30 min.

A través de la aplicación de esta técnica, seguida del análisis cromatográfico (con un tiempo de desorción de fibra de 3 min.), se detectaron cuatro terpenos en la muestra arqueológica del contenido del cerámico: 1R- α -Pino, Canfeno, β -Terpinil acetato y Junipeno. Cabe mencionar que el 1R- α -Pino y el Junipeno, también fueron detectados en la muestra del cerámico. Se destaca que estos dos terpenos fueron los que se presentaron en mayor concentración en el copal blanco con lo cual, Díaz (2016) validó la hipótesis de que la vasija había tenido un uso ceremonial.

5.3 Identificación de resina de copal en vasijas prehispánicas del sitio arqueológico El Zapotal, Veracruz, pertenecientes al Periodo Clásico

La región Sureste del estado de Veracruz es reconocida como el sitio de origen de la cultura Olmeca, la denominada “cultura madre” (Piña & Covarrubias, 1964). En la sección anterior, se habló del análisis realizado a muestras arqueológicas provenientes de una ofrenda en la costa norte del mismo estado, pero en el caso de la tesis de doctorado de Velasco (en prensa, 2021), se analizan los braseros, sahumadores y vasijas de distintos sitios arqueológicos del Centro de Veracruz, zona que ha sido reconocida como una región pluriétnica, dada su diversidad lingüística en tiempos de la conquista (Ortíz, 1994). En esta sección, se abordará en concreto el caso del sitio arqueológico El Zapotal.

El sitio arqueológico de El Zapotal, se encuentra en el municipio Ignacio de la Llave, Veracruz, en la zona central del estado (Fig. 10). Éste ha sido un sitio de estudio importante para los arqueólogos, al menos desde la década de los setentas con los trabajos de Manuel Torres Guzmán (Daneels, 2006; SIC, 2020; Tiesler *et al.*, 2013). Se ha descrito que su periodo de máximo esplendor fue durante el Clásico Tardío (600-900 d. C.). Si bien se ha propuesto a la cultura Totonaca como la última en habitarlo, dicha teoría no ha sido reconocida cabalmente pues, la ocupación totonaca en la Mixtequilla ocurrió durante el Posclásico (900-1521 d. C.) (Ségora, 2005); también se ha relacionado

con las culturas mixe-zoqueanas, sin embargo, no se cuentan con las evidencias suficientes para definir la identidad étnica de los pobladores de la región de El Zapotal (Loera, 2009).



Fig. 10. Ubicación de El Zapotal, y otros sitios arqueológicos aledaños. Reproducido de Tiesler *et al.*, 2013.

El Zapotal alberga dos grandes basamentos (de 10 a 15 m de altura), conocidos como “El Cerro de la Gallina”, orientado al norte, y “El Cerro del Gallo”, orientado al sur. Dentro de los hallazgos arqueológicos, destaca la ofrenda mortuoria en honor al dios *Mictlantecuhтли*, dios de la muerte y del inframundo, el cual fue representado en una escultura tamaño natural hecha de barro sin cocer, flanqueada por murales policromados. Junto con dicha escultura, se hallaron restos óseos de humanos, figuras antropomorfas y zoomorfas de distintos tamaños, figuras de caritas sonrientes, braceros, entre otras piezas interesantes (Del Alba León, 2010; Loera, 2009; Torres, 2004; Tiesler *et al.*, 2013).

Así pues, ante los escasos trabajos sobre el tipo de ofrendas depositadas en los braceros y sahumadores, la maestra Velasco, en colaboración con el Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural (LANCIC), sede Instituto de Química, UNAM, realizó el análisis del contenido de 19 piezas provenientes de El Zapotal, Veracruz (Fig. 11), datadas del periodo Clásico (200 – 900 d. C.). Las muestras se analizaron mediante espectrometría en el infrarrojo-ATR y CG-EM, a través del raspado del interior de las mismas. Para ello, se utilizaron los

marcadores lupano, ursano y oleanano. Para el análisis espectroscópico, se maceraron las muestras en un mortero ágata y, posteriormente, esta fue depositada en el módulo de ATR del espectrómetro. El proceso de medición se realizó considerando un escaneo en el rango de los 400- 4,000 nm (Velasco, en prensa, 2021).

En cuanto al análisis cromatográfico, se tomaron 50 mg de muestra y se le agregó 1 mL de hexano para posteriormente someterlas a un baño ultrasónico, y seguir con su centrifugación. El extracto que se obtuvo, se concentró vertiéndolo en viales con insertos, los cuales se colocaron bajo una corriente de N₂ hasta que el disolvente se evaporara. Después de dicho proceso de extracción, se agregaron 100 µL de hexano a los insertos y las muestras fueron inyectadas en el CG-EM, aplicando una rampa de temperatura, He como gas inerte y una columna no polar HP-5 ms de 30 m. Para el análisis de espectrometría, el modo de ionización empleado fue por impacto electrónico (70 eV) y, para comparar los espectros de masas obtenidos con otros de referencia, se consultó la biblioteca del National Institute of Standards and Technology (NIST), versión 14 (Velasco, en prensa, 2021).

Si bien, con la técnica de espectrometría en el infrarrojo no fue posible la detección de bandas asociadas a compuestos orgánicos debido, probablemente, a que estos compuestos se encontraban en cantidades muy pequeñas (por lo que se consideró que el análisis no era concluyente para determinar la presencia de copal en las piezas); los resultados cromatográficos mostraron que en 12 de las 19 muestras analizadas, se hallaban moléculas asociadas a la resina de copal siendo estas, la α - y β -amirina, además del lupeol. También es interesante mencionar que, en algunas de esas doce muestras se identificó metil-7-isopropil fenantreno (reteno) y metil dehidroabietato.

Considerando la información anterior, se concluyó que las piezas en las que no se detectó la presencia de compuestos orgánicos, probablemente fueron utilizados como tapas de los sahumadores y braseros. Sin embargo, aquellas muestras donde se identificó lupeol, α - y β -amirina, fueron asociadas a piezas que habían contenido copal. En lo que se refiere a la detección de reteno y metil dehidroabietato, se sugirió que su presencia se debía a que el material contenido en dichos braseros y sahumadores había sido sometido a algún tratamiento con calor.



Fig. 11. Piezas de El Zapotal, Veracruz (Periodo Clásico, 200 – 900 d. C.).
A. Brasero, B. tapa, C. sahumador, D. brasero con figura de mujer y tapa, E.
tapa, F. vasija. Fotografías cortesía de Velasco, R. – Museo de Antropología de
Xalapa.

Discusión

En México, la denominación *copal* hace referencia a las resinas que se han empleado desde tiempos prehispánicos y hasta la actualidad como incienso. Si bien, antiguamente éstas pudieron haberse extraído de plantas de distintos géneros, se reconoce que varias especies de la familia Burseraceae han sido la fuente principal de esta resina. La gran mayoría de ellas pertenecen al género *Bursera*, el cual es característico de la vegetación selva baja caducifolia (SBC), misma que se extiende en distintas regiones del país.

El copal obtenido a partir de los árboles del género *Bursera* es producido en los canales resiníferos de sus tallos y ramas. Dichos canales se extienden a lo largo del tronco describiendo una red, de tal manera que, conforme los canales se encuentran más cercanos a la corteza, sus células epiteliales presentan un mayor grado de lignificación en sus paredes y con ello, una menor capacidad de síntesis de resina. Sin embargo, al permitir la acumulación de ésta, facilitan su drenado en caso de que el tronco sea herido, protegiéndolo contra agentes patógenos.

De hecho, considerando lo descrito por distintos autores (CONABIO, 2008; Montúfar, 2012; 2015; Purata & León, 2005; Purata & León; 2008), se puede considerar que la técnica de colecta del copal preservada en diferentes regiones de la Cuenca del Río Balsas, refleja un conocimiento empírico respecto a la importancia de la profundidad que deben tener los cortes, ya que éstos no parecen dañar las células productoras de resina y, por lo tanto, se previene que el árbol sea afectado debido a alguna infección por hongos o parásitos. Adicionalmente, esta técnica ha contribuido a que los árboles puedan ser aprovechados en repetidas ocasiones. Después de todo, la extracción de esta resina, además de ser una práctica tradicional asociada a los diversos usos medicinales, artísticos y espirituales, es una fuente de ingresos para las familias de distintas comunidades de la región.

Ha sido, precisamente, a través del registro de los distintos usos que se le dio al copal en tiempos prehispánicos (como tributo, para el tratamiento de enfermedades, en figuras talladas y ofrendadas a los dioses, entre otras), y aquellos que aún se conservan (para sahumar templos, pedir por las lluvias, en la medicina tradicional, etc.) (Montúfar, 2012; 2015; Purata, 2008; Stacey *et al.*, 2006); que en la actualidad se puede considerar como un referente de la cultura mexicana. Como tal, ha promovido distintas líneas de investigación en áreas diversas, siendo la Arqueología y la Biología algunas de ellas, llegando a incentivar trabajos entre ambas disciplinas.

Sólo en años recientes, las investigaciones arqueo-botánicas relacionadas con el copal (resinas producidas por *Bursera* y *Protium*) se han desarrollado a través del uso de técnicas de química analítica, contando (hasta donde se tiene conocimiento) tan sólo con un par de ellas realizadas en México y una más realizada en Inglaterra, las cuales se presentaron en este trabajo. Así pues, a continuación, se analizan algunas de las consideraciones técnicas descritas por dichas investigaciones, las cuales podrían fungir como un referente para aquellos interesados en esta área de investigación. Considerando que en sólo uno de ellas se hizo uso de la espectrometría en el infrarrojo, se comenzará discutiendo dicho trabajo.

Como se describió en la sección anterior, la espectrometría en el infrarrojo/ATR formó parte de los análisis realizados para el trabajo de investigación de Velasco (en prensa, 2021), sin embargo, debido a la ausencia de bandas asociadas a compuestos orgánicos, dicho análisis no fue útil en la determinación del tipo de moléculas que presentaban las muestras arqueológicas obtenidas de El Zapotal, Veracruz. Drzewicz *et al.* (2016) mencionan que, si bien en algunas ocasiones los espectros de IR presentan ambigüedades, ya que algunas muestras de resina no presentan espectros distintivos, existe la posibilidad de utilizar esta técnica en la caracterización de resinas. Muestra de ello se puede hallar en el ámbar báltico, resinas fósiles depositadas en la región Báltica, correspondientes al periodo Paleógeno (Wolfe *et al.*, 2009). En dichas resinas, se ha descrito un patrón distintivo en sus espectros: un hombro entre los 1250 y 1110 cm^{-1} , seguido de una banda bien definida a 1157 cm^{-1} , patrón al que se le ha denominado “Hombro báltico” (Drzewicz *et al.*, 2016; Wolfe *et al.*, 2009).

Así pues, puesto que la técnica de espectrometría en el infrarrojo ha demostrado ser útil en la adquisición de datos moleculares a partir de muestras de resinas que han estado expuestas a múltiples factores ambientales, inclusive durante periodos de tiempo mayores a la edad de las resinas empleadas en tiempos prehispánicos; puede considerarse que las perspectivas son favorables para el estudio del copal presente en contextos arqueológicos. Así mismo, se denota la necesidad de realizar mayores investigaciones que ayuden a determinar las condiciones más apropiadas para el análisis de muestras arqueológicas donde se busque determinar la presencia de este tipo de resina, como podrían ser la cantidad de muestra o el tratamiento que se le debe dar a la misma.

Por otra parte, a partir del análisis de resinas contemporáneas, Martín-Ramos y colaboradores (2018) describen que las resinas se pueden distinguir mediante la espectrometría en el infrarrojo-ATR al presentarse dos bandas en particular: una entre 1,650 y 1,633 cm^{-1} , correspondiente a las vibraciones de los enlaces C=C, y una segunda entre los 1,260 y 1,238 cm^{-1} , asociada al enlace C-H.

Adicionalmente, mencionan que otra banda característica es la asociada al grupo carbonilo (C=O), entre los 1,738 y 1,694 cm^{-1} , la cual se puede ensanchar ante procesos de degradación y oxidación. Considerando que el copal blanco (*Bursera* spp.) fue una de las resinas que analizó y cuyo espectro presentó dichas señales, estos resultados pueden considerarse como referencia para futuros análisis relacionados con el copal mediante espectrometría en el infrarrojo-ATR.

En lo que refiere al análisis mediante CG-EM, de acuerdo con el procedimiento desarrollado por Díaz (2016), el implementado en el LANCIC para el trabajo de Velasco (en prensa, 2021), y el descrito por Stacey y colaboradores (2006), las muestras no recibieron ningún tratamiento previo al proceso de extracción con disolventes. Sin embargo, en el estudio sobre los adhesivos empleados en mosaicos aztecas/mixtecas del siglo XV-XVI, por Stacey *et al.* (2006), sí se menciona que los extractos obtenidos fueron derivatizados con BSTFA y TMCS. Este proceso consiste en una reacción de sililación, es decir, en la sustitución de un hidrógeno activo (-SH, -OH, -NH, -COOH) por un grupo de silicio con tres sustituyentes (presente en el TMCS), (Blau & Halket, 1993; Orata, 2012). Lo que resulta importante en los materiales resinosos, dada la presencia de moléculas con grupos hidroxilo (-OH) o ácidos carboxílicos (-COOH) (Modugno & Ribechini, 2009), como lo son el lupeol, la α - y β -amirina, así como el ácido isopimárico, hallados en algunas de las resinas analizadas por Stacey *et al.* (2006).

Considerando que los triterpenos (compuestos predominantes en las resinas de la familia Burseraceae) son de naturaleza apolar (Ríos *et al.*, 2000), la extracción de los analitos a través de disolventes no polares realizada por Stacey *et al.* (2006) y los investigadores del LANCIC (Velasco, en prensa, 2021), utilizando cloroformo/metanol (2:1 v/v) y hexano, respectivamente, nos recuerda la importancia de considerar la polaridad de los analitos de interés en la selección de los disolventes para la realización de este proceso ya que, como se ha reportado, los terpenos no polares son extraídos de una manera más eficiente al emplear disolventes de esa misma naturaleza (Jiang *et al.*, 2016). En el caso de Díaz (2016), para la aplicación de la MEFS se utilizó una fibra PDMS/DVB, de polaridad media, la cual también ha sido descrita como una alternativa en la extracción de terpenos contenidos en muestras arqueológicas (Hamm *et al.*, 2003).

Por otra parte, la selección de una columna no polar para el análisis cromatográfico por parte de los tres trabajos presentados, resulta adecuada dado que, de acuerdo con Stashenko & Martínez (2010a), esto promueve la elución de los analitos de acuerdo con sus volatilidades. Además, al haber aplicado un gradiente de temperatura escalonada que va de menor a mayor, en las tres investigaciones

se facilitó la elución de los componentes de la muestra, permitiendo que aquellos que fueran más difíciles de eluir lo hicieran a mayores temperaturas, mientras los que eluían con mayor facilidad, lo hicieran en las etapas iniciales del proceso (Christian, 2009).

Puesto que los compuestos orgánicos que se pueden hallar en materiales arqueológicos, se encuentran en calidad de compuestos traza (Giorgi, 2009), la inyección de las muestras en modo *splitless* previno la pérdida de información que se pudiera obtener de las mismas (Stashenko & Martínez, 2010a). A este punto también contribuye el que la adquisición de datos en el espectrómetro de masas se realizara en modo de barrido completo (*full scan*), lo que indica que la selectividad de la respuesta fue universal, es decir, que el detector generó una respuesta ante todos los componentes eluidos (Stashenko & Martínez, 2010a).

A través de las consideraciones técnicas previamente descritas, Stacey y colaboradores (2006) identificaron la presencia de diterpenos con esqueleto de abietano (ácido neoabietico, dehidroabietico) y pimarano (ácido pimárico, isopimárico, sandarapimárico) los cuales son característicos de resinas de coníferas, además de triterpenos de tipo oleanano (como la β -amirina), lupano (lupeol) y ursano (como la α -amirina), comunes en la resina de la familia Burseraceae (Colombini & Modugno, 2009; Korhonen & Tuhkanen, 2000). Como se mencionó en la sección anterior, Díaz (2016) identificó cuatro terpenos en la muestra arqueológica (1R- α -Pineno, Canfeno, β -Terpinil acetato y Junipeno), los cuales también fueron hallados en la muestra de copal blanco, presentando tiempos de retención muy similares. De manera similar, los resultados obtenidos por el equipo de trabajo del LANCIC, permitieron a la maestra Velasco (en prensa, 2021) reconocer la presencia de compuestos asociados a resinas de burseras (α -amirina, β -amirina y lupeol).

Aunque en ninguno de los trabajos citados se definen las especies de burseras de las que se pudo haber obtenido el copal hallado en las piezas arqueológicas, vale la pena destacar los resultados obtenidos por Stacey *et al.* (2006) en las muestras obtenidas del cuchillo (Fig. 9H). En ellas, se identificó α - y β -amirina en una abundancia que guardaba una relación 2:1, así como la presencia en menor cantidad de maniladiol (tipo oleanano) y breine; lo cual, les permitió deducir que la resina correspondía al género *Protium*, ya que la resina de otras especies del mismo género, han presentado una composición similar, como es el caso de *P. heptaphyllum* (Susunaga *et al.*, 2001). Dicho hallazgo permitió hacer una distinción entre aquellas resinas producidas por el género *Protium* y *Bursera* siendo que, en las resinas de referencia de este último, los compuestos que presentaban mayor abundancia fueron: lupeol, β -amirina y α -amirina.

Los resultados descritos anteriormente, permiten tener un acercamiento a la utilidad de la CG-EM en la identificación de copal en muestras arqueológicas a través de las moléculas (principalmente triterpenos) que se han reportado como constituyentes de resinas producidas por plantas de la familia Burseraceae. Esto ha brindado información sobre los tipos de resinas que algunas culturas prehispánicas empleaban como adhesivos en la fabricación de distintas piezas (Stacey *et al.*, 2006), así como del tipo de ofrenda que diferentes culturas precolombinas del estado de Veracruz depositaban en vasijas (Díaz, 2016; Velasco, en prensa, 2021).

Por otra parte, no se puede ignorar el hecho de que los triterpenos son metabolitos secundarios que se pueden hallar en la resina de una gran variedad de plantas, pudiéndose mencionar dentro de familia Burseraceae a los géneros *Commiphora* y *Boswellia*, pero éstos se distribuyen principalmente en el continente africano (GBIF Secretariat, 2021a; GBIF Secretariat, 2021b). También se tiene a las familias Dipterocarpaceae y Anacardiaceae (Mills & White, 1977), aunque los ejemplares de la familia Dipterocarpaceae se distribuyen de manera característica en los bosques tropicales perennifolios de Sureste de Asia (Krishnapillay, 2004; Mills & White, 1977).

En lo que se refiere las Anacardiaceae, éstas se distribuyen en distintas regiones de los estados de Guanajuato, Querétaro y Michoacán, comprendiendo parte de la Cuenca del Río Balsas (Rzedowski & Calderón de Rzedowski, 1999). De hecho, de acuerdo con Martínez (1979), las plantas descritas por Francisco Hernández como *copalxócotl* y *copalxócotl* segundo, corresponden actualmente a *Spondias purpurea* y *S. mombin*, respectivamente. Aunque el término *copalxócotl* también se ha asociado al género *Cyrtocarpa* (De Ávila Blomberg, 2012; Moreira, 2018), específicamente *C. procera* (CONABIO, 2021a). Todas las especies mencionadas son miembros de la familia Anacardiaceae. Sin embargo, como se mencionó al inicio de este trabajo, se ha reconocido que desde tiempos prehispánicos existía una preferencia por las resinas producidas por algunas especies de los géneros *Bursera* y *Protium* (Burseraceae) como fuente de copal (Montúfar, 2012).

Es importante mencionar que hasta donde se tiene conocimiento, aun no se han desarrollado estudios sobre la composición de la resina producida por *S. purpurea*, *S. mombin*, o *C. procera*, lo cual permitiría hacer una distinción más clara entre el copal que se pudo haber obtenido de dichas especies y, aquellas extraídas de *Bursera* y *Protium*. De la familia Anacardiaceae, la resina terpénica que se ha estudiado es la producida por el género *Pistacia*, cuyos componentes principales son: los damaranos, el ácido masticadienoico, isomasticadienoico, el ácido morónico y el oleanónico

(Colombini & Modugno, 2009), siendo el último compuesto el único que, hasta el momento, también se ha reportado en las resinas de *Bursera* (Stacey *et al.*, 2006).

Otra característica importante de la CG-EM en el estudio de resinas arqueológicas como el copal, es que permite tener una aproximación a los procesos a los que éstas fueron sometidas, ya fuera por procesos de envejecimiento, o por las prácticas de las culturas antiguas, como lo describen los resultados de Stacey *et al.* (2006) y los del LANCIC (Velasco, en prensa, 2021), respectivamente. En el trabajo de Stacey y colaboradores (2006), se mencionan que la mayoría de los diterpenos que se hallaron en los mosaicos corresponden a los compuestos originales de las resinas de *Pinus* spp., sin embargo, los que se presentaron en mayor abundancia correspondían a productos de degradación, generados a partir de procesos de oxidación. De tal manera que, la composición de las resinas empleadas en algunas piezas, indicaban la presencia de una típica resina de pino antigua.

En el caso de las piezas estudiadas por Velasco (en prensa, 2021), las moléculas identificadas como reteno y metil dehidroabietato se han asociado a resinas de la familia Pinaceae (Bleton & Tchaplá, 2009; Colombini & Modugno, 2009; Colombini *et al.*, 2005). Los compuestos diterpénicos de dichas resinas (particularmente el ácido abiético), al ser sometidos a procesos de calentamiento, experimentan modificaciones en sus esqueletos de carbono, derivadas de procesos de deshidrogenación, descarboxilación y dimetilación (Evershed *et al.*, 1985; Pollard & Heron, 1996), lo que resulta en la síntesis de reteno como producto final (Stacey *et al.*, 2006). Así pues, el reconocimiento de compuestos estructuralmente alterados, que mantienen una coherencia con los esqueletos de carbono de sus precursores, brinda información adicional sobre la historia de los residuos orgánicos preservados en las piezas arqueológicas y, por ende, de las culturas que empleaban dichas piezas.

Conclusión

El copal tiene una larga historia como parte de la cultura de México, la cual ha podido ser constatada a través de códices mesoamericanos y coloniales, los distintos artefactos que se han hallado en varios sitios arqueológicos, así como por los usos tradicionales que se le dan actualmente en diversas comunidades del país. En el ámbito de la arqueobotánica, se ha logrado hacer su identificación a través de documentos históricos y los restos botánicos que han sobrevivido al paso del tiempo. Sin embargo, a través de los trabajos de investigación presentados y analizados en la presente tesina, se puede considerar que, el campo de la química analítica representa una importante área de apoyo para la investigación etnobotánica y arqueobotánica del copal.

Si bien a través de la CG-EM no se han logrado definir las especies de las que pueden provenir las muestras arqueológicas, sí es muy útil para tener un acercamiento a la familia o al género de las plantas utilizadas, siendo *Bursera* spp. o *Protium copal* (Burseraceae) para el caso del copal. En esta labor, sigue siendo muy importante el material bibliográfico que permita constatar los usos que se les daban a las plantas en tiempos prehispánicos ya que delimitan las posibles fuentes botánicas y metabolitos secundarios a buscar. Si bien, en México son varias las plantas que producen resinas, la composición química de aquellas que provienen de la familia Burseraceae, así como las diversas referencias históricas, han permitido asociar a varias especies de *Bursera* y a *Protium copal*, como las fuentes de obtención del copal en el México prehispánico.

Por otra parte, aunque la espectrometría en el infrarrojo se ha reportado como una técnica complementaria para este tipo de análisis, su utilidad puede verse comprometida cuando los compuestos orgánicos se hallan en muy bajas concentraciones. Sin embargo, en vista de los antecedentes sobre su utilidad en el estudio de piezas arqueológicas que presentan resinas, así como en el análisis de resinas fósiles, se considera necesario incentivar las investigaciones sobre el copal, haciendo uso de la espectrometría IR-ATR, de tal manera que se puedan determinar las mejores condiciones metodológicas para su estudio.

Para futuras investigaciones, se propone complementar el estudio de los copales analizando la composición de su resina y buscar si hay diferencias en ella debido a su distribución geográfica, así como conocer su constitución en los restos calcinados de la resina quemada. Esto contribuirá a mejorar el conocimiento que tenemos del copal como componente fiel de nuestra cultura y, probablemente, a incentivar los trabajos interdisciplinarios entre la biología, la química y la arqueología.

Referencias

- Ahuja, S. (2003). *Chromatography and separation science*. Estados Unidos de América: Academic Press.
- Azcón-Bieto, J. & Talón, M. (2013). *Fundamentos de fisiología vegetal*. Madrid: McGraw Hill-Interamericana.
- Barlow, R. (1992). La extensión del imperio de los cultivos mexicanos. *Obras de Robert H. Barlow*, vol. IV, Jesús Monjarás-Ruiz (traducción y notas), Jesús Monjarás-Ruiz, Elena Limón y María de la Cruz Paillés H. (Eds.), INAH/Universidad de las Américas, Puebla.
- Becerra, J. & Venable, D. (1999). Nuclear ribosomal DNA phylogeny and its implications for the evolutionary trends in Mexican *Bursera* (Burseraceae). *American Journal of Botany*, 86(7): 1047-1057.
- Blancas, J., Abad-Fitz, I., Beltrán-Rodríguez, L., Cristians, S., Rangel-Landa, S., Casas, A., Torres-García, I. & Sierra-Huelsz, J. (2022). Chemistry, biological activities, and uses of copal resin (*Bursera* spp.) in Mexico. En: Murthy, H. (Ed.). *Gums, resins and latexes of plant origin*. Springer.
- Blau, K. & Halket, J.M. (1993). *Handbook of derivatives of chromatography*. Londres: John Wiley.
- Bleton, J. & Tchaplal, A. (2009). SPME/GC-MS in the characterisation of terpenic resins. En: Colombini, M. & Modugno, F. (Eds.). *Organic mass spectrometry in art and archaeology*. Italia: John Wiley & Sons.
- Bye, R. & Linares, E. (2016). Ethnobotany and ethnohistorical sources of mesoamerica. En: Lira R., Casas A., Blancas J. (Eds.). *Ethnobotany of Mexico*. Ethnobiology. Nueva York: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6669-7_3
- Caicedo, P. (2011). *Extractabilidad de pesticidas organoclorados y su biodisponibilidad en sistemas suelo-biosólido*. Tesis de Doctorado en Química. Universidad de Chile, Chile, Santiago.
- Casas, A., Blancas, J. & Lira, R. (2016). Mexican ethnobotany: interactions of people and plants in Mesoamerica. En: Lira R., Casas A. & Blancas J. (Eds.). *Ethnobotany of Mexico*. Ethnobiology. Nueva York: Springer.

- Case, R., Tucker, A., Maciarello, M. & Wheeler, K. (2003). Chemistry and ethnobotany of commercial incense copals, copal blanco, copal oro, and copal negro, of North America. *Economic Botany*, 57(2): 189-202.
- Cházaro-Basáñez, M., Mostul, B. & García-Lara, F. (2010). Los copales mexicanos (*Bursera* spp.). *Bouteloua*, 7: 57-70.
- Christian, G. (2009). Química Analítica. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores.
- Coggings, C. & Ladd, J. (1992). Artifacts from the Cenote of Sacrifice, Chichen Itza, Yucatan: textiles, basketry, stone, bone, shell, ceramics, wood, copal, rubber, other organic materials, and mammalian remains. Estados Unidos de América: Peabody Museum of Archaeology & Ethnology, Harvard University.
- Colombini, M. & Modugno, F. (2009). Organic materials in art and archaeology. En: Colombini, M. & Modugno, F. (Eds.). Organic mass spectrometry in art and archaeology. Italia: John Wiley & Sons.
- Colombini, M., Modugno, F. & Ribechini, E. (2005). Direct exposure electron ionization mass spectrometry and gas chromatography/mass spectrometry techniques to study organic coatings on archaeological amphorae. *J. Mass Spectrom.*, 20: 675-687.
- Columba-Palomares, M., Villarreal, M., Acevedo, M., Marquina, S., Álvarez, L. & Rodríguez, V. (2015). Anti-inflammatory and cytotoxic activities of *Bursera copallifera*. *Phcog. Mag.*, 11(44): 322-328.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (2008). Copales, diversidad y cultura. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, México. Recuperado de:
https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janiumbin/janium_zui.pl?jzd=/janium/Documentos/ETAPA06/AP/6402/copales.jzd&fn=6402
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (2021a). Enciclovida: Coco de cerro, *Cyrtocarpa procera*. Recuperado el 26 de abril del 2022 de:
<https://enciclovida.mx/especies/171291-cyrtocarpa-procera>

- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (2021b). Copales. biodiversidad mexicana. Recuperado el 6 de abril del 2022 de: <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/ceremonial-y-ritual/copales>
- Craig, O., Love, G., Isaksson, S., Taylor, G. & Snape, C. (2004). Stable carbon isotopic characterisation of free and bound lipid constituents of archaeological ceramic vessels released by solvent extraction, alkaline hydrolysis and catalytic hydrolysis. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 71: 613-634.
- Crowther, A., Veall, M., Boivin, N., Horton, M., Kotarba-Morley, A., Fuller, D., Fenn, T., Haji, O. & Matheson, C. (2015). Use of Zanzibar copal (*Hymenaea verrucosa* Gaertn.) as incense at Unguja Ukuu, Tanzania in the 7-8th century CE: Chemical insights into trade and Indian Ocean interaction. *Journal of Archaeological Science*, 53: 374-390. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/268449137_Use_of_Zanzibar_copal_Hymenaea_verrucosa_Gaertn_as_incense_at_Unguja_Ukuu_Tanzania_in_the_78th_century_CE_Chemical_insights_into_trade_and_Indian_Ocean_interactions
- Daher, C. & Bellot-Gurlet, L. (2013). Non-destructive characterization of archaeological resins: seeking alteration criteria through vibrational signatures. *Analytical Methods*, 5(23): 6583-6591. doi:10.1039/c3ay41278d
- Daneels, A. (2006). José García Payón y Alfonso Medellín Zenil, pioneros de la arqueología del centro de Veracruz. *An. Antrop.*, 40(2): 9-40.
- De Ávila Blomberg, A. (2012). Yerba del coyote, veneno del perro: la evidencia léxica para identificar plantas en el Códice de la Cruz Badiano. *Acta Botánica Mexicana*, 100: 489-526.
- De la Cruz-Cañizares, J., Doménech-Carbó, M., Gimeno-Adelantado, J., Mateo-Castro, R. & Bosch-Reig, F. (2005). Study of Burseraceae resins used in binding media and varnishes from artworks by gas chromatography–mass spectrometry and pyrolysis-gas chromatography–mass spectrometry. *J. Chromatogr. A*, 1093: 177-194.
- Del Alba León, X. (2010). Enterramientos prehispánicos en el sur de Veracruz. Tesis de Maestría en Estudios Mesoamericanos. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- De-Nova, A., Medina, R., Montero, J., Weeks, A., Rosell, J., Olson, M. Eguiarte, L. & Magallón, S. (2012). Insights into the historical construction of species-rich Mesoamerican seasonally dry

tropical forests: the diversification of *Bursera* (Burseraceae, Sapindales). *New Phytologist*, 193: 276-287.

De Sahagún, Fr. B. (1577). Historia general de las cosas de la Nueva España. Recuperado el 18 de abril del 2022 de:

https://www.loc.gov/resource/gdcwdl.wdl_10096_001/?st=pdf&pdfPage=1

Díaz, A. (2016). Análisis de resina de copal por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas y microextracción en fase sólida. Aplicación en el análisis de muestras arqueológicas. Tesis de Licenciatura en Química. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

Dietemann, P., Higgitt, C., Kälin, M., Edelmann, M., Knochenmuss, R. & Zenobi, R. (2009). Aging and yellowing of triterpenoid resins varnishes – Influence of aging conditions on resin composition. *J. Cult Herit.* 10: 30-40.

Drzewicz, P., Natkaniec-Nowak, L. & Czapla, D. (2016). Analytical approaches for studies of fossil resins. *Trends in Analytical Chemistry*, 85: 75-84.

Duce, C., Orsini, S., Spepi, A., Colombini, M., Tiné, M. & Rivechini, E. (2015). Thermal degradation chemistry of archaeological pine pitch containing beeswax as an additive. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 111: 254-264.

Evershed, P. (1993). Biomolecular archaeology and lipids. *World Archaeology*, 25: 74-93.

Evershed, P. (2008). Organic residue analysis in archaeology: the archaeological biomarker revolution. *Archaeometry*, 50: 895-924.

Evershed, P., Jerman, K. & Eglinton, G. (1985). Pine wood origin for pitch from the *Mary Rose*. *Nature*, 314: 528-5.

Espinosa, D., Montaña, G. & Becerril, F. ¿Qué son y dónde viven los copales? En: Purata, S. (Ed.). (2008). Uso y manejo de los copales aromáticos: resinas y aceites. México: CONABIO/RAISES.

Fahn, A. (1988). Secretory tissues in vascular plants. *New Phytol.*, 108: 229-257.

Fernández, F., Rodríguez, C., Arreguín, M. & Rodríguez, A. (1998). Listado florístico de la Cuenca del Río Balsas, México. *Polibotánica*, 9: 1-151.

Fernández, G. (2014). Determinación estructural. Oviedo: Academia Minas.

- Font, J., Salvadó, N. Butí, S. & Enrich, J. (2007). Fourier transform infrared spectroscopy as a suitable technique in the study of the materials used in waterproofing of archaeological amphorae. *Analytica Chimica Acta*, 598: 119-127.
- Fraenkel, G. (1959). The Raison d'Être of Secondary Plant Substances. *Science*, 129(3361): 1466-70. doi: 10.1126/science.129.3361.1466.
- García-Cook, A. (1997). Richard Stockton MacNeish y el origen de la agricultura. *Arqueología Mexicana*, 25: 40-43. Recuperado en: <https://arqueologiamexicana.mx/mexico-antiguo/el-origen-de-la-agricultura-y-richard-stockton-macneish>
- García, M. (2015). Efluvios mensajeros. El copal y el *yauhtli* en los sahumeros del Templo Mayor. *Arqueología Mexicana*, 23(135): 44-49.
- GBIF Secretariat. (2021a). *Boswellia* Roxb. ex Colebr. GBIF Backbone Taxonomy. Checklist dataset <https://doi.org/10.15468/39omei> Recuperado el 3 de febrero del 2022.
- GBIF Secretariat. (2021b). *Commiphora* Jacq. GBIF Backbone Taxonomy. Checklist dataset. <https://doi.org/10.15468/39omei> Recuperado el 3 de febrero del 2022.
- Ghosh, S. & Purkayastha, K. (1960). Anatomical studies on the resiniferous system in *Boswellia serrata* Roxb. trees. *Indian Forester*, 86: 684-695.
- Gigliarelli, G., Becerra, J., Curini, M. & Marcotullio, M. (2015). Chemical composition and biological activities of fragrant Mexican copal (*Bursera* spp.). *Molecules*, 20(12): 22383-22394.
- Giorgi, G. (2009). Overview of Mass Spectrometric Based Techniques Applied in the Cultural Heritage Field. En: Colombini, M. & Modugno, F. (Eds.). *Organic Mass Spectrometry in Art and Archaeology*. Italia: John Wiley & Sons.
- Glavcheva, Z., Yancheva, D., Kancheva, Y., Velcheva, E. & Stamboliyska, B. (2014). Development of FTIR spectra database of reference art and archaeological materials. *Bulgarian Chemical Communications*, 46(A): 164-169.
- Gómez-Díaz, J., Krömer, T., Carvajal, C., Gerold, G. & Heitkamp, F. (2017). Richness and distribution of herbaceous angiosperms along gradients of elevation and forest disturbance in central Veracruz, México. *Botanical Sciences*, 95(2): 307-328.

- Greener, J., Abbasi, B. & Kumacheva, E. (2010). Attenuated total reflection Fourier transform spectroscopy for on-chip monitoring of solute concentrations. *Lab Chip*, 10: 1561-1566.
- Grice, K., Holman, A., Plet, C. & Tripp, M. (2019). Fossilised biomolecules and biomarkers in concretions from Konservat-Lagerstätten. *Minerals*, 9, 158. <https://doi.org/10.3390/min9030158>
- Guízar, E. & Sánchez, A. (1991). Guía para el reconocimiento de los principales árboles del Alto Balsas, México. México: Universidad Autónoma Chapingo-Dirección de Ciencias Forestales.
- Hamm, S., Lesellier, E., Bleton, J. & Tchaplá, A. (2003). Optimization of headspace solid phase microextraction for gas chromatography/mass spectrometry analysis of widely different volatility and polarity terpenoids in olibanum. *J. Chromatogr. A*, 1018: 73-83.
- Hayek, E., Krenmayr, P., Lohninger, H., Jordis, U., Moche, W., & Sauter, F. (1990). Identification of archaeological and recent wood tar pitches using gas chromatography/mass spectrometry and pattern recognition, *Analytical Chemistry*, 62: 2038-43.
- Hernández, F. (2019). Metodología en espectroscopía infrarroja como apoyo para la determinación de grupos funcionales en hidrocarburos. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Petrolera. Universidad Nacional Autónoma de México, México, Ciudad de México.
- Hernández-Ramírez, A. (2020). *Libellus de medicinalibus indorum herbis: Códice Cruz-Badiano. Cuadernos de biodiversidad* (58): 1-8. <https://doi.org/10.14198/cdbio.2020.58.01>
- Hersch, P. & Sierra, J. (2008). Más allá del aroma: breve historia del Linaloe. *En*: Purata, S. (Ed.). *Uso y manejo de los copales aromáticos: resinas y aceites*. México: CONABIO/RAISES.
- IBUNAM (Instituto de Biología, UNAM). (Ed.). (s/f). Historia de las plantas de la Nueva España de Francisco Hernández, edición 1942-1946 por el Instituto de Biología. Recuperado el 18 de abril del 2022 de: <http://www.ibiologia.unam.mx/plantasnuevaspana/prologo.html>
- INAH (Instituto Nacional de Antropología e Historia). (s/f). Códice Badiano. Recuperado el 18 de abril del 2022 de: <https://www.mediатеca.inah.gob.mx/repositorio/islandora/object/codice:851#page/1/mode/2up>
- Irekani, Instituto de Biología, UNAM. (2016). Árboles del Inventario Nacional Forestal 2013. Recuperado de: <http://unibio.unam.mx/irekani/?proyecto=Irekani&column=2>

- Jiang, Z., Kempinski, C. & Chappell, J. (2016). Extraction and analysis of terpenes/terpenoids. *Curr. Protoc. Plant Biol.*, 1:345-358. doi: 10.1002/cppb.20024
- Kałużna-Czaplińska, J., Marzena, A. & Kwapiński, W. (2016). Different analytical procedures for the study of organic residues in archeological ceramic samples with the use of gas chromatography-mass spectrometry. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 46:1, 67-81.
- Korhonen, S. & Tunkanen, T. (2000). Effects of ozone on resin acids in thermomechanical pulp and paper mill circulation waters. *Ozone Science and Engineering*, 22: 575-584.
- Kou, D. & Mitra, S. (2003). Extraction of semivolatile organics from solid matrices. En: Mitra, S. (Ed.). *Sample preparation techniques in analytical chemistry*. Estados Unidos de América: Wiley- Interscience.
- Krishnapillay, B. (2004). Tropical ecosystems, dipterocarps. En: Burley, J. (Ed.). *Encyclopedia of forest sciences*. Elsevier.
- Langenheim, H. (2003). *Plant resins: chemistry, evolution, ecology and ethnobotany*. Portland, OR: Timber Press.
- Leonhardt, S., Schmitt, T. & Blüthgen, N. (2011). Tree resin composition, collection behavior and selective filters shape chemical profiles of tropical bees (Apidae: Meliponini). *PLoS ONE*, 6(8): 1-10.
- Loera, C. (2009). *La representación del inframundo: registro de la pintura mural prehispánica de “El Zapotal”*, Veracruz. Tesis de Maestría en Historia del Arte. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Long, A., Benz, B., Donahue, D., Jull A. & Toolin, L. (1989). First direct AMS dates on early maize from Tehuacan, Mexico. *Radiocarbon*, (31): 1035-1040.
- López-Toledo, J., Valdez-Hernández, J., Pérez-Farrera, M. & Cetina-Alcalá, V. (2012). Composición y estructura arbórea de un bosque tropical estacionalmente seco en la reserva de la biósfera la sepultura, Chiapas. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 3(12): 43-56.
- Lucero-Gómez, P., Mathe, C., Vieillescazes, C., Bucio-Galindo, L., Belio-Reyes, I. & Vega-Aviña, R. (2014a). Archaeobotanic: HPLC molecular profiles for the discrimination of copals in Mesoamerica. Application to the study of resin materials from objects of Aztec offerings. *ArcheoSciences, revue d'archéométrie*, 38: 119-133.

- Lucero-Gómez, P., Mathe, C., Vieillescazes, C., Bucio, L., Belio, I. & Vega, R. (2014b). Analysis of Mexican reference standards for *Bursera* spp. resins by gas chromatography-mass spectrometry and application to archaeological objects. *Journal of Archaeological Science*, 41: 679-690.
- Martín-Ramos, P., Fernández-Coppel, I., Ruíz-Potosme, N. & Martín-Gill, J. (2018). Potential of ATR-FTIR spectroscopy for the classification of natural resins. *BEMS Reports*, 4(1): 03-06.
- Martínez, M. (1979). Catálogo de nombres vulgares y científicos de plantas mexicanas. México: Fondo de Cultura Económica.
- Metcalf, R. & Chalk, L. (1950). Anatomy of the dicotyledons leaves, stem and wood in relation to taxonomy with notes on economy uses. Oxford: Clarendon press.
- Mc Vaugh, R. & Rzedowski, J. (1965). Synopsis of the genus *Bursera* L. in western Mexico, with notes on the material of *Bursera* collected by Sessé & Mociño. *Kew Bull.*, 18: 317-382.
- McClung de Tapia, E. (1990). A perspective on Mexican ethnobotany. *J. Ethnobiol.*, 10(2): 141-147.
- McClung de Tapia, E. (1991). Proyección metodológica para la arqueobotánica en México. *Antropología y técnica*, 4: 57-71.
- Medina, R. (2008). Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. *Fascículo 66*. México: Instituto de Biología, UNAM.
- Medina-Lemos, R. & CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (2021). El género *Bursera* en México. Parte II. Versión 1.9. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Recuperado el 5 de mayo del 2022 de <https://doi.org/10.15468/qcpinc>
- Merali, Z., Cayer, C., Kent, P., Liu, R., Cal, V. & Harris, C. (2018). Sacred Maya incense, copal (*Protium copal* - Burseraceae), has antianxiety effects in animal models. *Journal of Ethnopharmacology*, 216: 63-70.
- Mills, S. & White, R. (1977). Natural resins of art and archaeology: their sources, chemistry and identification, *Studies in Conservation*, 22: 12-31.
- Miranda, F. (1947). Estudios sobre la vegetación de México - V. Rasgos de la vegetación en la Cuenca del Río de las Balsas. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.*, 8: 95-114.

- Modugno, F., Ribechini, E. & Colombini, M. (2006). Aromatic resin characterisation by gas chromatography-mass spectrometry. Raw and archaeological materials. *J. Chromatogr., A* 1134: 298-304.
- Modugno, F. & Ribechini, E. (2009). GC/MS in the characterisation of resinous materials. En: Colombini, M. & Modugno, F. (Eds.). *Organic mass spectrometry in art and archaeology*. Italia: John Wiley & Sons.
- Mohar, L. (1987). El tributo mexicana en el siglo XVI: análisis de dos fuentes pictográficas. México, CIESAS (Cuadernos de la Casa Chata, núm. 154).
- Montúfar, A. (1998). Arqueobotánica del centro ceremonial de Tenochtitlan. *Arqueología Mexicana*, 6(31): 34-41. Recuperado de: <https://arqueologiamexicana.mx/mexico-antiguo/arqueobotanica-del-centro-ceremonial-de-tenochtitlan>
- Montúfar, A. (2004). Identidad y simbolismo del copal prehispánico y reciente. *Arqueología*, 33: 60-71. Recuperado de: <https://revistas.inah.gob.mx/index.php/arqueologia/article/view/6278>
- Montúfar A. (2007). Los copales mexicanos y la resina sagrada del Templo Mayor de Tenochtitlan. Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Montúfar, A. (2012). Ofrendas de copal: un estudio comparativo entre el Templo Mayor de Tenochtitlan y Temalacatzingo, Guerrero. Tesis de Doctorado en Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Montúfar, A. (2014). La arqueobotánica del Templo Mayor. *Arqueología Mexicana*, edición especial, 56: 81.
- Montúfar, A. (2015). Copal, humo aromático de tradición ritual mesoamericana. *Arqueología Mexicana*, 23(135): 64-65.
- Montúfar, A. (2016). Copal de *Bursera bipinnata*. Una resina mesoamericana de uso ritual. *Trace (México, DF)*, 70: 45-77.
- Morales-Serna, J., Cruz-Galicia, E., García-Ríos, E., Madrigal, D., Gaviño, R., Cárdenas, J. & Salmón, M. (2013). Three new diarylbutane lignans from the resin of *Bursera fagaroides*. *Natural Product Research: Formerly Natural Product Letters*, 27(9): 824-829.

- Morehart, C. (2002). Ancient maya ritual cave utilization: a paleoethnobotanical perspective. Thesis for the degree of Masters of Science. The Florida State University, College of Arts and Sciences, Tallahassee, Florida, US.
- Moreira, F. (2018). An historical context for the Voynich Codex: Aztec Mexico and catholic Spain. En: Tucker, A & Janick, J. (Eds.). *Unraveling the Voynich Codex. Fascinating life sciences.* Suiza: Springer.
- Murugesan, K., Ravi kumar, G., Jain, S., Mohan, S., & Nair, S. (2012). Wood exudates overview on aromatic gums and resins. *Journal Indian Academic Wood Science*, 8(2): 72-75.
- Museo Británico de Londres. (s/f). Galleries: Mexico. Recuperado de: <https://www.britishmuseum.org/collection/galleries/mexico>.
- Orata, F. (2012). Derivatization reactions and reagents for gas chromatography analysis. En: Mohd, M. (Ed.). *Advanced gas chromatography, progress in agricultural, biomedical and industrial applications.* Croacia: InTech.
- Ortíz, P. (1994). Semblanza arqueológica de Veracruz. *Arqueología Mexicana*, 5: 16-23.
- Palermo, F., De Araújo, M., De Nicolai, J., Rodrigues, S. & Rodrigues, T. (2018). Resin secretory canals in *Protium heptaphyllum* (Aubl.) Marchand. (Burseraceae): a tridimensional branched and anastomosed system. *Protoplasma*, 255: 899-910.
- Papakosta, V., Smittenberg, R., Gibbs, K., Jordan P. & Isaksson, S. (2015). Extraction and derivatization of absorbed lipid residues from very small and very old samples of ceramic potsherds for molecular analysis by gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS) and single compound stable carbon isotope analysis by gas chromatography–combustion– isotope ratio mass spectrometry (GC–C– IRMS). *Microchemical Journal*, 123: 196-200.
- Philp, P. & Oung, N. (1988). Biomarkers: occurrence, utility, and detection. *Anal. Chem.*, 60: 887A-896A.
- Piña, R. & Covarrubias, L. (1964). *El pueblo del jaguar: olmecas arqueológicos.* México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Piña-Torres, C., Lucero-Gómez, P., Nieto, S., Vázquez, A., Bucio, L., Belio, I., Vega R., Mathe, C. & Vieillescazes C. (2017). An analytical strategy based on Fourier transform infrared spectroscopy, principal component analysis and linear discriminant analysis to suggest the

- botanical origin of resins from *Bursera*. Application to archaeological Aztec Samples. *Journal of Cultural Heritage*, 33: 48-59. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.02.006>
- Piqué, T. & Vázquez, A. (2012). Uso de espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, 3(2): 62-71.
- Pollard, M. & Heron, C. (1996). *Archaeological chemistry*. Cambridge, UK: The Royal Society of Chemistry.
- Pompa, M., Sigala, J. & Jurado, E. (2017). Some tree species of ecological importance in Mexico: A documentary review. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(2): 186-219.
- Purata, S. (2008). Algunos usos del copal. En: Purata, S. (Ed.). *Uso y manejo de los copales aromáticos: resinas y aceites*. México: CONABIO/RAISES.
- Purata, S., Brosi, B. & Chibnik. (2005). Alebrijes: figuras fantásticas talladas en madera de copal. En: López, C., Chanfón, S. & Segura, G. (Eds.). *La riqueza de los bosques mexicanos: más allá de la madera. Experiencias de comunidades rurales*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable, Comisión Nacional Forestal.
- Purata, S. & León, C. (2005). Copal: alimento de los dioses y protector de los humanos. En: López, C., Chanfón, S. & Segura, G. (Eds.). *La riqueza de los bosques mexicanos: más allá de la madera. Experiencias de comunidades rurales*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos.
- Purata, S. & León, C. (2008). La Colecta de resina. En: Purata, S. (Ed.) *Uso y manejo de los copales aromáticos: resinas y aceites*. México: CONABIO/RAISES.
- Quiroz, J. & Magaña, M. (2015). Resinas naturales de especies vegetales mexicanas: usos actuales y potenciales. *Madera y Bosques*, 21(3):171-183.
- Rasgado, F. (2014). Caracterización fitoquímica de la resina de *Liquidambar styraciflua* L. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. de México.
- Regert, M., (2004). Investigation of prehistoric glues by gas chromatography-mass spectrometry, *Journal of Separation Science*, 27: 244-54.

- Regert, M., Langlois, J., & Colinart, S. (2005). Characterisation of wax works of art by gas chromatographic procedures, *Journal of Chromatography A*, 1091: 124-36.
- Ríos, L., Recio, C., Máñez, S. & Giner, M. (2000). Natural triterpenoids as anti-inflammatory agents. En: Atta-ur-Rahman (Ed.) Studies in natural products chemistry (Part C). Vol. 22: 93-143.
[https://doi.org/10.1016/S1572-5995\(00\)80024-1](https://doi.org/10.1016/S1572-5995(00)80024-1)
- Ríos, T., Quijano, L. & Reyes-Chilpa, R. (2012). Algunas reflexiones actuales sobre la herbolaria prehispánica desde el punto de vista químico. *Rev. latinoamer. Quím.* 40(2): 41-64.
- Rodríguez, O. (2013). Estudio espectroscópico de la formación de análogos de resinas fósiles. Tesis de Doctorado. Universidad Complutense de Madrid, España, Madrid.
- Roffet-Salque, M., Dunne, J., Altoft, D., Casanova, E., Cramp, L., Smyth, J., Whelton, J. & Evershed, R. (2017). From the inside out: upscaling organic residue analyses of archaeological ceramics. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 16: 627-640.
- Romero-Estrada, A., Maldonado-Magaña, A., González-Christen, J., Marquina, S., Garduño-Ramírez, M., Rodríguez-López, V. & Álvarez, L. (2016). Anti-inflammatory and antioxidative effects of six pentacyclic triterpenes isolated from the Mexican copal resin of *Bursera copallifera*. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 16: 422.
- Rzedowski, J. & Calderón de Rzedowski, G. (1996). Burseraceae. *Flora de Veracruz, fascículo, 94*. México: Instituto de Ecología/Universidad de California.
- Rzedowski, J. & Calderón de Rzedowski, G. (1999). Anacardiaceae. *Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes, fascículo 78*. Pátzcuaro, Michoacán, México: Instituto de Ecología, Centro Regional del Bajío.
- Rzedowski, J. & Calderón de Rzedowski, G. (2005). Inventario del conocimiento taxonómico, así como de la diversidad y del endemismo regionales de las especies mexicanas de *Bursera* (Burseraceae). *Acta Botánica Mexicana*, 70: 85-111.
- Rzedowski, J. & Guevara-Féfer, F. (1992). Burseraceae. *Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes, fascículo 3*. Pátzcuaro, Michoacán, México: Instituto de Ecología, Centro Regional del Bajío.
- Rzedowski, J. & Kruse, H. (1979). Algunas tendencias evolutivas en *Bursera* (Burseraceae). *Taxon*, 28(1/3): 103-116.

- Rzedowski, J., Medina-Lemus, R. & Calderón de Rzedowski, G. (2004). Las especies de *Bursera* (Burseraceae) en la Cuenca Superior del Río Papaloapan (México). *Acta Botánica Mexicana*, 66: 23-151.
- Salazar, J. (2013). Métodos de ensayo para la determinación cualitativa y cuantitativa del contenido de polímero presente en ligantes asfálticos modificados. *Métodos y Materiales*, 3(1): 4-20. <https://doi.org/10.15517/mym.v3i1.13482>
- Sánchez, J., Tejeda, M., Sánchez, J. & Sánchez, M. (2012). La farmacia, la medicina y la herbolaria en el código florentino. *Rev. mex. cienc. farma.*, 43(3): 55-66.
- Savin, A. (s/f). Espectroscopía: espectroscopía infrarrojo. Recuperado el 27 de mayo del 2020 de: <https://www.quimicaorganica.org/blog-usuarios-quimica-organica/924-espectroscopia-de-infrarrojo.html>
- Ségora, D. (2005). Escultura de la Mixtequilla, Veracruz. *Arqueología Mexicana*, 71: 72-75.
- Serrano-Rosas, I. (2018). Diferenciación de los sistemas vascular y de defensa en plántulas del género *Bursera* (Burseraceae). Tesis de Licenciatura en Biología. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Los Reyes Iztacala, Edo. de México.
- Shillito, L., Almond, M., Wicks, K., Marshall, L. & Matthews, W. (2009). The use of FT-IR as a screening technique for organic residue analysis of archaeological samples. *Spectrochimica Acta Part A Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 72(1): 120-125.
- SIC (Sistema de Información Cultural). (2020). Museo de Sitio El Zapotal. Recuperado el 6 de abril del 2022, de: https://sic.cultura.gob.mx/ficha.php?table=museo&table_id=134
- Skoog, D., Holler, F., & Crouch, S. (2018). Principles of instrumental analysis. Australia: Cengage Learning.
- Sosa, V., De-Nova, A. & Vásquez, M. (2018). Evolutionary history of the flora of Mexico: dry forests cradles and museums of endemism. *J. Syst. Evol.*, 56(5): 523-536.
- Souza, L., Trindade, F., Oliveira, R., Costa, L., Gomes, V. & Cunha, M. (2015). Histochemical characterization of secretory ducts and essential oil analysis of *Protium* species (Burseraceae). *J. Essent. Oil Res.*, 28(2): 166-171. <https://doi.org/10.1080/10412905.2015.1092478>

- Stacey, R., Cartwright, C. & McEwan, C. (2006). Chemical characterization of ancient Mesoamerican 'copal' resins: preliminary results. *Archaeometry*, 48(2): 323-340.
- Stashenko, E. & Martínez, J. (2009). Algunos aspectos de la detección en cromatografía de gases y cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas. Selectividad e identificación. *Scientia Chromatographica*, 1(3): 31-49.
- Stashenko, E. & Martínez, J. (2010a). GC y GC-MS: configuración del equipo versus aplicaciones. *Scientia Chromatographica*, 2(3): 33-59.
- Stashenko, E. & Martínez, J. (2010b). GC-MS: más de un analizador de masas, ¿para qué? *Scientia Chromatographica*, 2(4): 25-48.
- Stuart, B. (2004). *Infrared spectroscopy: fundamentals and applications*. England: John Wiley & Sons.
- Susunaga, G., Siani, A., Pizzolatti, M., Yunes, R., & Delle Monache, F. (2001). Triterpenes from the resin of *Protium heptaphyllum*, *Fitoterapia*, 72: 709-11.
- Thermo Fisher Scientific. (2013a). Introduction to Fourier transform infrared spectroscopy. Recuperado de:
https://assets.thermofisher.com/TFSAssets/CAD/brochures/BR50555_E_0513M_H_1.pdf
- Thermo Fisher Scientific. (2013b). Introduction to FT-IR sample handling. Recuperado de:
https://assets.thermofisher.com/TFSAssets/CAD/brochures/BR50557_E_IntroSampHand0613M_H_1.pdf
- Toledo, C. (1982). El género *Bursera* (Burseraceae) en el estado de Guerrero (México). Tesis de Licenciatura en Biología. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, México, D.F.
- Tolera, M., Menger, D. Sass-Klaassen, U., Sterck, F., Copini, P. & Bongers, F. (2013). Resin secretory structures of *Boswellia papyrifera* and implications for frankincense yield. *Annals of Botany*, 111: 61-68.
- Torres, M. (2004). Los entierros múltiples en El Zapotal. En: Lira, Y. & Serrano, C. (Eds.). *Prácticas funerarias en la costa del Golfo de México*. México: Universidad Veracruzana/UNAM.

- Tiesler, V., Romano-Pacheco, A., Gómez-Valdés, J. & Daneels, A. (2013). Posthumous body manipulation in the Classic Period Mixtequilla: Reevaluating the human remains of Ossuary I from El Zapotal, Veracruz. *Latin American Antiquity*, 24(1): 47-71.
- UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México). (Ed.). (2015). Obras completas de Francisco Hernández. Tomos I a VII, 8 volúmenes. Recuperado el 18 de abril del 2022 de: <http://www.franciscohernandez.unam.mx/home.html>
- Velasco, R. (en prensa, 2021). Análisis de los quemadores de incienso del Centro de Veracruz. Tesis de Doctorado en Estudios Mesoamericanos. Instituto de Investigaciones Filológicas, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Villaseñor, J. (2010). El bosque húmedo de montaña en México y sus plantas vasculares: catálogo florístico-taxonómico. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad - Universidad Nacional Autónoma de México.
- Villaseñor, J. & Ortiz, E. (2014). Biodiversidad de las plantas con flores (División Magnoliophyta) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad, Supl.* 85: S134-S142.
- Weininger, S. & Stermitz, F. (1988). Química Orgánica. España: Reverté
- Wells, M. (2003). Principles of extraction and the extraction of semivolatile organics from liquids. En: Mitra, S. (Ed.). Sample preparation techniques in analytical chemistry. US: Wiley-Interscience.
- Wolf, A., Tappert, R., Muehlenbachs, K., Boundreau, M., McKellar, R., Basinger, J. & Garrett, A. (2009). A new proposal concerning the botanical origin of Baltic amber. *Proc. R. Soc. B* 276: 3403-3412. doi:10.1098/rspb.2009.0806
- Zlotnik, A. & Ponce, M. (2013). Tejidos Vegetales. En: Márquez, J., Collazo, M., Martínez, M., Orozco, A., Vázquez, S. Biología de angiospermas. México: Coordinación de la Investigación Científica. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Zulak, K. & Bohlmann, J. (2010). Terpenoid biosynthesis and specialized vascular cells of conifer defense. *Journal of Integrative Plant Biology*, 52(1): 86-97.

Anexo. Especies pertenecientes a la familia Burseraceae aprovechadas como fuentes de copal en México, sus nombres comunes y su ubicación geográfica

Listado realizado a partir de la revisión de los trabajos de Blancas *et al.* (2022), CONABIO (2008), Gigliarelli *et al.* (2015), Medina-Lemos & CONABIO (2021), Montúfar (2016), Morales-Serna *et al.* (2013), Quiroz & Magaña (2015), Rzedowski & Calderón de Rzedowski (1996), Rzedowski & Calderón de Rzedowski (2005), Rzedowski *et al.* (2004).

Orden: Sapindales

Familia: Burseraceae

Género: *Bursera*

Subgénero: *Bursera*

B. ariensis

B. fagaroides

B. simaruba

Subgénero: *Bullockia*

B. bipinnata

B. citronella

B. copallifera

B. cuneata

B. excelsa

B. glabrifolia

B. graveolens

B. laxiflora

B. linanoe

B. microphylla

B. palmeri

B. penicillata

B. tomentosa

B. vejar-vazquezii

Género: *Protium*

P. copal

Nombres comunes

Copal, copal amarillo, copal blanco, guande

Aceitillo, chutama, cuajilote, palo mulato

Chaca, chicohuiste, chocohuite, palo retinto

Copal chino, copal santo, copal negro

Almárciga, linaloe

Copal blanco, copal de penca, copal ancho

Copal

Copalillo, pomo, sisiote

Copal blanco, copal hembra, copal liso

Aceitilla, palo de brujo, palo hediondo

Copal mulato, toro, torote prieto

Linaloe, inamé, olinaloé, ulinoé

Palo colorado, torotoe, torote blanco

Copal

Copalillo, pepelillo, torote copal

Copal

Copal espinazo, copal espinoso

Aceitillo, zapotillo, jom, jomte, pom

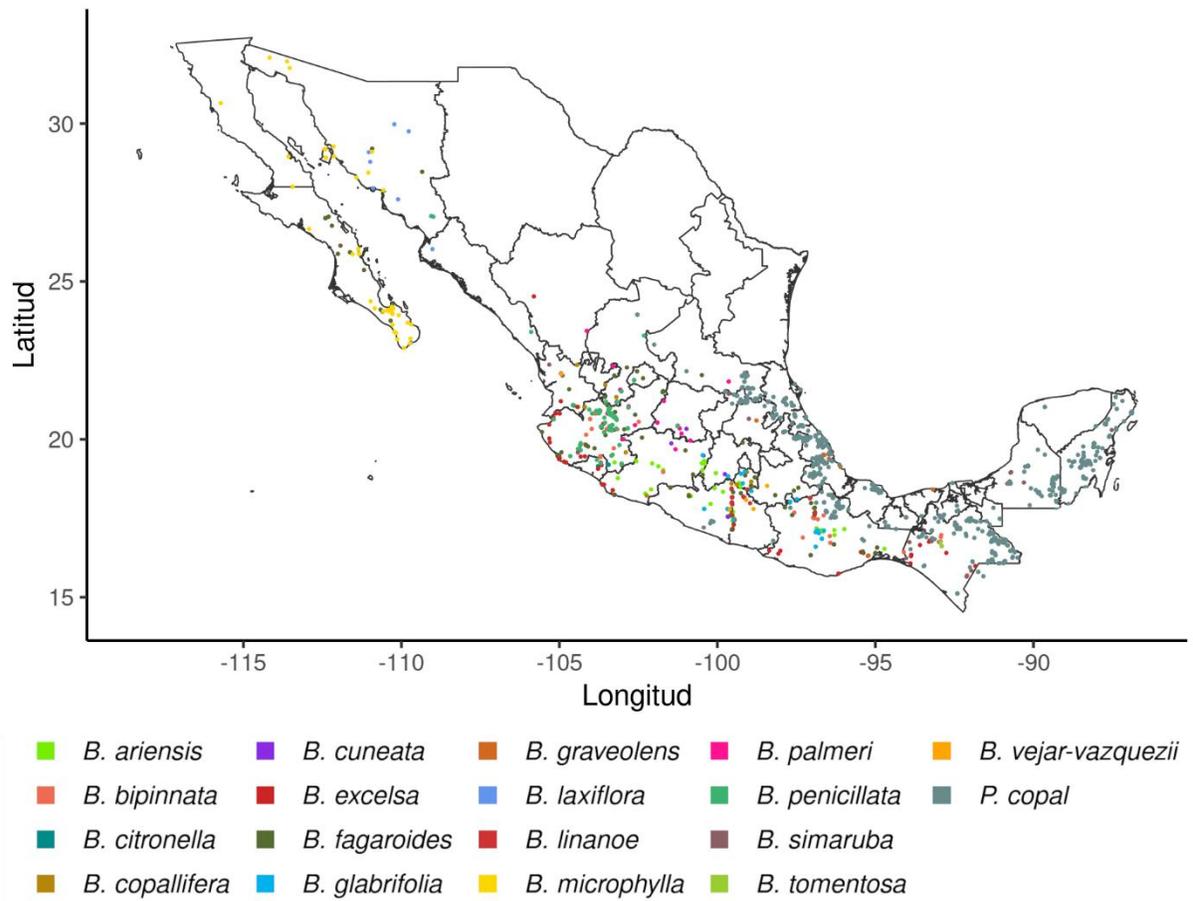


Fig. 12. Distribución geográfica de las fuentes botánicas de copal en México. Realizado por Martínez-Trueba, L., con datos de Medina-Lemos & CONABIO (2021).