



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**ANÁLISIS DE RESIDUOS ORGÁNICOS MEDIANTE
ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO (FTIR-ATR) Y
CROMATOGRAFÍA DE GASES ACOPLADA A ESPECTROMETRÍA DE
MASAS (CG-EM) PARA LA IDENTIFICACIÓN DE COPAL EN
SAHUMADOR Y BRASEROS DEL SITIO ARQUEOLÓGICO NOPILOA,
VERACRUZ**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

Edwin Galicia Florín



Ciudad Universitaria, CD. MX.

2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

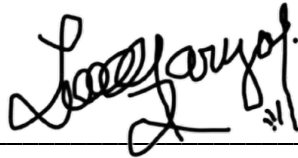
Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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.

PRESIDENTE: **Profesor:** José Manuel Méndez Stivalet
VOCAL: **Profesora:** Katia Solórzano Maldonado
SECRETARIO: **Profesora:** Marisol Reyes Lezama
1er. SUPLENTE: **Profesora:** Luz María Nava Fernández
2º SUPLENTE: **Profesor:** Luis Daniel Sifuentes Vázquez

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: LABORATORIO NACIONAL DE CIENCIAS PARA LA INVESTIGACIÓN Y CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO CULTURAL (LANCIC), INSTITUTO DE QUÍMICA (IQ), UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM)

ASESORA DEL TEMA:



Marisol Reyes Lezama

SUPERVISORA TÉCNICA:



Rocío Velasco Fuentes

SUSTENTANTE:



Edwin Galicia Florín

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por todo lo que me ha dado desde que ingresé a la Escuela Nacional Preparatoria plantel 2.

A la Facultad de Química, por la experiencia tan agradable que ha sido pertenecer a esta escuela y por la formación que ahí recibí.

Al Instituto de Química, por la oportunidad que tuve de realizar mi servicio social y trabajo de tesis en el LANCIC-IQ (financiado por el CONACYT a través de los proyectos LN232619, LN260779, LN279740, LN293904, LN271614 y LN293904).

A la Dra. Marisol Reyes Lezama, por la gentil bienvenida que me dio al aceptarme como su alumno en el LANCIC-IQ. Gracias también por sus enseñanzas, sus consejos y toda la ayuda brindada para la realización de esta investigación.

A la Mtra. Rocío Velasco Fuentes y la Dra. Annick Dannels, por permitirme participar en su proyecto; en especial a la Mtra. Rocío por las muestras proporcionadas, por sus valiosos comentarios y por supervisar este trabajo.

Al Mtro. José Manuel Méndez Stivalet, la Q. Katia Solórzano Maldonado, la Dra. Marisol Reyes Lezama, la Mtra. Luz María Nava Fernández y el Dr. Luis Daniel Sifuentes Vázquez, por el apoyo brindado para la realización de esta tesis al haber aceptado ser parte del jurado.

A la M. en C. Mayra León Santiago y el M. en C. Everardo Tapia Mendoza, investigadores del LANCIC-IQ, por la totalidad de los conocimientos que compartieron conmigo durante mi estancia en el laboratorio. Gracias Mtra. Mayra por su disposición para ayudarme, por sus comentarios y por su asesoría.

Al Q. Emilio Iturbe Nava y la Biól. Rocío Daniela Martínez Godoy, compañeros estudiantes del LANCIQ-IQ, por asistirme cuando tenía alguna duda y por ayudarme con el procesamiento de las muestras.

Al Dr. Alfonso Romo de Vivar y a los académicos del Laboratorio 2-7 del IQ, por su amabilidad al permitirme usar los instrumentos de su laboratorio.

Al Museo de Antropología de Xalapa (MAX), por las facilidades concedidas a la Mtra. Rocío Velasco Fuentes para el muestreo de las piezas arqueológicas analizadas.

ÍNDICE

ÍNDICE	<i>i</i>
LISTA DE FIGURAS	<i>iv</i>
LISTA DE TABLAS	<i>ix</i>
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	<i>xi</i>
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
HIPÓTESIS	5
OBJETIVOS	6
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES	7
1.1 Cultura del centro de Veracruz	7
1.1.1 Nopiloa	9
1.2 Los quemadores de copal prehispánicos	11
1.3 El copal	13
1.3.1 Origen botánico	15
1.3.2 Composición química	16
1.3.3 Usos	20
1.4 Análisis de residuos orgánicos	22
1.4.1 Materiales orgánicos en arqueología	26
1.5 Análisis químicos de copal prehispánico y contemporáneo	30

ÍNDICE

1.6 Espectroscopía de infrarrojo	31
1.6.1 Fundamento	32
1.6.2 Espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier	35
1.6.2.1 Instrumentación	36
1.6.3 Interpretación de los espectros de infrarrojo medio (MIR)	38
1.7 Cromatografía de gases	39
1.7.1 Instrumentación	40
1.8 Espectrometría de masas	43
1.8.1 Instrumentación	44
1.8.2 Ionización electrónica	45
1.8.3 El espectro de masas	47
CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	49
2.1 Materiales y equipos	49
2.1.1 Disolventes y reactivos	49
2.1.2 Materiales de laboratorio	49
2.1.3 Instrumentos	50
2.1.4 Equipos	50
2.2 Muestras de braseros y sahumador	51
2.3 Preparación de los extractos de las muestras de quemadores de copal	54
2.4 Análisis con espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier	56
2.5 Análisis con cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas	57
CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
3.1 Análisis con espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier	59
3.1.1 Análisis de las muestras de quemadores de copal	60
3.1.1.1 Señales debidas a compuestos inorgánicos	62
3.1.1.2 Evaluación de la presencia de residuos orgánicos	65

ÍNDICE

3.1.2	Análisis de los extractos	69
3.2	Análisis con cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas	75
3.2.1	Identificación de materiales orgánicos arqueológicos	78
3.2.1.1	Biomarcadores de copal detectados en los extractos	78
3.2.1.2	Biomarcadores de pino, de bitumen e hidrocarburos aromáticos policíclicos detectados en los extractos	87
3.2.2	Contaminación de las muestras	91
3.2.3	Propuesta acerca del proceso de constitución de los residuos orgánicos discutidos	96
	CONCLUSIONES	100
	PERSPECTIVAS	102
	REFERENCIAS	103
	ANEXO A ESPECTROS DE INFRARROJO DE LAS MUESTRAS DE QUEMADORES DE COPAL	116
	ANEXO B CROMATOGRAMAS DE LOS EXTRACTOS Y COMPUESTOS IDENTIFICADOS	132

LISTA DE FIGURAS

- Figura 0.1. Ideograma de copal en el código Mendoza. 4
- Figura 1.1. Región la Mixtequilla-Tuxtlas. 7
- Figura 1.2. Caritas sonrientes expuestas en el Museo Nacional de Antropología, Ciudad de México. 8
- Figura 1.3. Ubicación de Nopiloa. 9
- Figura 1.4. Plano de isolíneas de Nopiloa. 10
- Figura 1.5. Quemadores de copal tipo brasero y sahumador. 12
- Figura 1.6. Representación de una persona sahumando, Código Durán. 13
- Figura 1.7. «Copal blanco» y «copal negro», resinas contemporáneas. 14
- Figura 1.8. Extracción de copal de *B. bipinnata*. 14
- Figura 1.9. Ejemplares de *B. linanoe* y *P. copal*. 15
- Figura 1.10. Ilustración del «Tzihuaccopalli», Código De la Cruz-Badiano. 16
- Figura 1.11. Biosíntesis de cadenas terpénicas a partir de dimetilalil difosfato (DMAPP) e isopentenil difosfato (IpPP). 17
- Figura 1.12. Ejemplos de monoterpenos y sesquiterpenos del copal. 18
- Figura 1.13. Principales triterpenos del copal. 19
- Figura 1.14. Dos lignanos encontrados en resinas de especies *Bursera*. 19
- Figura 1.15. Incrustaciones dentales mayas. 20
- Figura 1.16. Figurillas aztecas fabricadas con copal. 21
- Figura 1.17. Mosaico prehispánico elaborado con resina de *Burseraceae* como adhesivo. 22
- Figura 1.18. Ungüentaria romana hallada en Oplontis, Italia. 23
- Figura 1.19. Bacteriohopanotetrol (BHT) y dos hopanoides encontrados en vasijas teotihuacanas. 25
- Figura 1.20. Teobromina, biomarcador arqueológico de consumo de cacao. 25

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.21. Ácido glutámico, aminoácido más abundante en la clara y yema de huevo. 27
- Figura 1.22. Ácido oleico, principal ácido graso del aceite de oliva. 27
- Figura 1.23. Hexacosanil 15-hidroxi palmitato, biomarcador de cera de abeja. 28
- Figura 1.24. Ácido morónico, triterpeno propio de resinas vegetales de especies *Pistacia*. 28
- Figura 1.25. Celulosa, polímero estructural de las plantas. 29
- Figura 1.26. Fitano, componente del bitumen. 29
- Figura 1.27. Indirubina, colorante natural de plantas del género *Indigofera*. 29
- Figura 1.28. Espectro electromagnético. 32
- Figura 1.29. Esquema de una onda electromagnética. 33
- Figura 1.30. Diagrama de un espectrómetro de infrarrojo con transformada de Fourier. 36
- Figura 1.31. Diagrama de un módulo ATR. 37
- Figura 1.32. Espectro de infrarrojo del metanol. 38
- Figura 1.33. Diagrama de un cromatógrafo de gases. 40
- Figura 1.34. Diagrama de un inyector *split/splitless*. 41
- Figura 1.35. Ejemplos de fases estacionarias líquidas para CG. 42
- Figura 1.36. Cromatograma de una serie de alcanos lineales. 43
- Figura 1.37. Diagrama de un espectrómetro de masas. 44
- Figura 1.38. Ruta de fragmentación del ácido 7-oxo-dehidroabiético. 46
- Figura 1.39. Diagrama de una fuente de iones por ionización electrónica. 46
- Figura 1.40. Espectro de masas representado como perfil de iones, gráfica de barras y tabla. 47
- Figura 1.41. Espectro de masas del hexano. 48
-
- Figura 2.1. Espectrómetro de infrarrojo del LANCIC-IQ. 50
- Figura 2.2. Cromatógrafo de gases acoplado al espectrómetro de masas del LANCIC-IQ. 51
- Figura 2.3. Muestras de quemadores de copal. 52

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.4. Brasero1, zonas de muestreo. 53
- Figura 2.5. Brasero2, zona de muestreo. 53
- Figura 2.6. Sahumador1, zonas de muestreo. 54
- Figura 2.7. Brasero3, zonas de muestreo. 54
- Figura 2.8. Diagrama de flujo del método de extracción. 55
- Figura 2.9. Diagrama de un baño de ultrasonido y el fenómeno de cavitación acústica. 56
- Figura 2.10. Rampa de temperatura del horno. 58
-
- Figura 3.1. Espectros de infrarrojo de los polvos. 61
- Figura 3.2. Comparación de los espectros de infrarrojo de cuatro muestras de barro entre 1320 y 820 cm^{-1} . 63
- Figura 3.3. Diferencias espectrales de los polvos de Brasero3. 65
- Figura 3.4. Comparación de los espectros de infrarrojo de los polvos en la región de absorción por estiramiento de enlaces C-H. 67
- Figura 3.5. Espectros de infrarrojo de hexano y diclorometano líquidos (obtenidos en el laboratorio con FTIR-ATR). 70
- Figura 3.6. Espectros de infrarrojo de los extractos. 71
- Figura 3.7. Comparación de los espectros de infrarrojo de los extractos en la región de absorción por estiramiento de enlaces C-H. 73
- Figura 3.8. Comparación de los espectros de infrarrojo de los extractos en la región de absorción por flexión de enlaces C-H. 74
- Figura 3.9. Espectros de infrarrojo de los extractos comparados con las regiones de absorciones típicas de resinas de *Bursera*. 75
- Figura 3.10. Cromatogramas de los extractos superpuestos. 77
- Figura 3.11. Estructuras moleculares del canfeno y del junipeno. 79
- Figura 3.12. Reacción general de sililación. 80
- Figura 3.13. Ubicación de los biomarcadores de copal en los cromatogramas de los extractos. 81
- Figura 3.14. Ruta de fragmentación de la α - y β -amirina. 83

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.15. Espectro de referencia de la α -amirina comparado con los componentes identificados como tal en EB1C y ES1P. 84
- Figura 3.16. Espectro de referencia de la β -amirina comparado con los componentes identificados como tal en EB1C, ES1P y EB3F. 85
- Figura 3.17. Espectro de referencia del acetato de β -amirina comparado con el componente identificado como tal en EB1P. 86
- Figura 3.18. Espectro de referencia del acetato de lupeol comparado con el componente identificado como tal en EB1C. 86
- Figura 3.19. Estructuras moleculares del acetato de β -amirina y del acetato de lupeol. 86
- Figura 3.20. Biomarcadores de resinas de pino, bitumen e hidrocarburos aromáticos policíclicos en el cromatograma de ES1F. 89
- Figura 3.21. Formación de dehidroabietato de metilo y dehidroabietino a partir de ácido abiético. 90
- Figura 3.22. Estructuras moleculares del fitano y del pristano. 90
- Figura 3.23. Estructuras moleculares de los hidrocarburos aromáticos policíclicos detectados. 91
- Figura 3.24. Algunos plastificantes detectados en los extractos. 94
- Figura 3.25. Plastificantes identificados en EB3F. 94
- Figura 3.26. Almizcles sintéticos detectados en los extractos. 95
- Figura 3.27. Estructura molecular del DDT y sus derivados detectados en los extractos. 96
- Figura 3.28. Posibles factores involucrados en la conformación de los residuos orgánicos de Brasero1, Sahumador1 y Brasero3 durante su uso. 99
-
- Figura A.1. Espectro de infrarrojo del polvo Brasero1P. 118
- Figura A.2. Espectro de infrarrojo del polvo Brasero1C. 119
- Figura A.3. Espectro de infrarrojo del extracto EB1P. 120
- Figura A.4. Espectro de infrarrojo del extracto EB1C. 121
- Figura A.5. Espectro de infrarrojo del polvo Brasero2G. 122
- Figura A.6. Espectro de infrarrojo del extracto EB2G. 123
- Figura A.7. Espectro de infrarrojo del polvo Sahumador1P. 124

LISTA DE FIGURAS

Figura A.8. Espectro de infrarrojo del polvo Sahumador1F.	125
Figura A.9. Espectro de infrarrojo del extracto ES1P.	126
Figura A.10. Espectro de infrarrojo del extracto ES1F.	127
Figura A.11. Espectro de infrarrojo del polvo Braserero3F.	128
Figura A.12. Espectro de infrarrojo del polvo Braserero3AFE.	129
Figura A.13. Espectro de infrarrojo del extracto EB3F.	130
Figura A.14. Espectro de infrarrojo del extracto EB3AFE.	131
Figura B.1. Cromatograma del extracto EB1P.	133
Figura B.2. Cromatograma del extracto EB1C.	136
Figura B.3. Cromatograma del extracto EB2G.	139
Figura B.4. Cromatograma del extracto ES1P.	141
Figura B.5. Cromatograma del extracto ES1F.	145
Figura B.6. Cromatograma del extracto EB3F.	148
Figura B.7. Cromatograma del extracto EB3AFE.	151

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Ejemplos de análisis químicos de copal prehispánico y estándares.	30
Tabla 1.2. Modos normales de vibración.	35
Tabla 1.3. Ejemplos de detectores para cromatografía de gases.	43
Tabla 2.1. Muestras de quemadores de copal.	52
Tabla 2.2. Extractos de los polvos de quemadores de copal.	56
Tabla 3.1. Señales más comunes en los espectros de infrarrojo de copales de <i>Bursera</i> .	59
Tabla 3.2. Señales más notables en los espectros de infrarrojo de los polvos.	62
Tabla 3.3. Absorciones de grupos CH ₂ y CH ₃ de alcanos.	66
Tabla 3.4. Señales en los espectros de infrarrojo de los polvos entre 3000 y 2800 cm ⁻¹ .	68
Tabla 3.5. Absorciones del hexano y diclorometano en el IR medio.	70
Tabla 3.6. Señales en los espectros de infrarrojo de los extractos.	72
Tabla 3.7. Algunos compuestos utilizados como biomarcadores de copal.	79
Tabla 3.8. Biomarcadores de copal detectados en los extractos.	81
Tabla 3.9. Marcadores químicos varios detectados en los extractos.	88
Tabla 3.10. Compuestos «contaminantes» detectados en los extractos.	92
Tabla 3.11. Factores que influyen en la constitución y conservación de un residuo orgánico.	97
Tabla 3.12. Biomarcadores encontrados relacionados con el uso de los quemadores.	98
Tabla B.1. Compuestos identificados en EB1P.	134
Tabla B.2. Compuestos identificados en EB1C.	137

LISTA DE TABLAS

Tabla B.3. Compuestos identificados en EB2G.	140
Tabla B.4. Compuestos identificados en ES1P.	142
Tabla B.5. Compuestos identificados en ES1F.	146
Tabla B.6. Compuestos identificados en EB3F.	149
Tabla B.7. Compuestos identificados en EB3AFE.	152

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

[<i>A_{FE}</i>]	Concentración del analito A en la fase estacionaria
[<i>A_{FM}</i>]	Concentración del analito A en la fase móvil
<i>A_{FE}</i>	Analito A en la fase estacionaria
<i>A_{FM}</i>	Analito A en la fase móvil
ATR	Reflectancia Total Atenuada, por sus siglas en inglés
BHT	Bacteriohopanotetrol
CG-EM	Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas
DDMU	1,1-Bis(p-clorofenil)-2-cloroetano
DDT	Diclorodifeniltricloroetano
DEHP	Ftalato de di(2-etilhexilo)
DEHT	Tereftalato de di(2-etilhexilo)
DEP	Ftalato de dietilo
DiBP	Ftalato de diisobutilo
DMAPP	Dimetilalil difosfato
DnBP	Ftalato de dibutilo
<i>E</i>	Energía
<i>E_X</i>	Energía de la especie química <i>X</i>
<i>E_X*</i>	Energía de la especie química <i>X</i> *
FIR	Infrarrojo lejano, por sus siglas en inglés
FTIR	Espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier, por sus siglas en inglés
GC/MS	Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas, por sus siglas en inglés
<i>h</i>	Constante de Planck (6.626x10 ⁻³⁴ J·s)
HAPs	Hydrocarburos aromáticos policíclicos

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

HP5-MS	Columna capilar con fase estacionaria (5%-fenil)-metilpolisiloxano
INAH	Instituto Nacional de Antropología e Historia
IpPP	Isopentenil difosfato
IQ	Instituto de Química
IR	Infrarrojo
K_A	Constante de distribución de A
LANCIC	Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural
m/z	Relación masa-carga
M^+	Ion molecular
MAX	Museo de Antropología de Xalapa
MIR	Infrarrojo medio, por sus siglas en inglés
NIR	Infrarrojo cercano, por sus siglas en inglés
NIST	Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (Estados Unidos), por sus siglas en inglés
o,p'-DDE	2,4'-Diclorodifenildicloroetileno
p,p'-DDE	4,4'-Diclorodifenildicloroetileno
PTV	Inyección con temperatura programada, por sus siglas en inglés
rDA	Reacción retroDiels-Alder
T	Temperatura
TIC	Corriente total de iones, por sus siglas en inglés
t_R	Tiempo de retención
TXIB	Diisoburato de 2,2,4-trimetil-1,3-pentanodiol
V	Volumen
X	Especie química en estado basal
X*	Especie química en estado excitado
γ	Vibración esquelética
δ	Flexión/deformación, también tijereteo
ΔE	Diferencia de energía

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

λ	Longitud de onda
$\tilde{\nu}$	Número de onda
ν	Frecuencia
ν	Estiramiento
ν_a, ν_{as}	Estiramiento asimétrico
ν_s	Estiramiento simétrico
π	Aleteo
ρ	Balanceo
τ	Torsión
ω	Aleteo

RESUMEN

Algunos objetos de barro encontrados en Nopiloo, sitio arqueológico perteneciente a la cultura del centro de Veracruz, probablemente fueron fabricados para servir como quemadores ceremoniales de copal. En espera de poder confirmar su uso, se analizaron siete muestras de polvo raspado de ciertas partes de cuatro piezas distintas: un sahumador (quemador transportable) y tres braseros (quemadores fijos).

En primer lugar, se recurrió a la espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR-ATR) para analizar el barro en polvo, con lo cual se demostró la presencia de compuestos orgánicos en seis muestras. Adicionalmente, en cuatro espectros se encontraron indicios de la exposición a altas temperaturas, manifestados en las absorciones de especies inorgánicas.

Posteriormente, usando hexano como disolvente, se prepararon extractos de los polvos con ayuda de un baño de ultrasonido. Mediante su análisis con FTIR-ATR se logró observar con mayor claridad las señales de alcanos. Utilizando cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG-EM), se identificaron biomarcadores de especies productoras de copal de los géneros *Bursera* y *Protium* en los extractos de cuatro muestras. También se detectaron terpenos característicos de plantas de la familia *Pinaceae*, hidrocarburos aromáticos policíclicos, aditivos de plásticos, almizcles sintéticos e incluso derivados de plaguicidas.

ABSTRACT

ORGANIC RESIDUE ANALYSIS BY MEANS OF INFRARED SPECTROSCOPY (FTIR) AND GAS CHROMATOGRAPHY-MASS SPECTROMETRY (GC/MS) FOR THE IDENTIFICATION OF COPAL IN A LADLE CENSER AND BRAZIER FROM THE NOPILOA (VERACRUZ) ARCHAEOLOGICAL SITE

Some of the clay objects found in Nopiloa, an archaeological site belonging to the Classic Veracruz culture, were probably crafted to be used as ritual copal burners. As a way to verify its usage, seven samples consisting of powder scraped from particular areas of four pieces, a ladle censer (transportable burner) and three braziers (fixed burners), were analyzed.

Firstly, the Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR-ATR) was employed to analyze the powders directly, allowing for the demonstration of the presence of organic compounds in six samples. Moreover, four spectra showcased, through the absorption pattern of inorganic species, evidence of the exposition to high temperatures.

Afterwards, extracts of the powders were prepared with hexane as solvent and utilising an ultrasonic bath. The analyses of the extracts by means of FTIR-ATR allowed for the clearer observation of alkane signals. Via gas chromatography-mass spectrometry (GC/MS), it was possible to identify biomarkers of copal producing species from the genera *Bursera* and *Protium* in the extracts of four samples. Distinctive terpenes of plants from the *Pinaceae* family, polycyclic aromatic hydrocarbons, plastic additives, synthetic musks, and even pesticides derivatives, were detected as well.

INTRODUCCIÓN

Quizás la datación de carbono-14 sea la aplicación más famosa de una técnica propia de las ciencias naturales para la examinación del patrimonio arqueológico. No obstante, las primeras investigaciones conocidas catalogables dentro de este marco datan de finales del siglo XVIII; desde entonces ha ido aumentando tanto la cantidad de publicaciones de esta clase, como el número de ramas científicas a las cuales se recurre. En respuesta a este fenómeno se han propuesto varios neologismos para designar a esta interacción interdisciplinaria, de los cuales destaca, por ser el primero y por su preferencia frente a otros, *archaeometry* («arqueometría» en español), que fue acuñado en 1950 solo considerando a los análisis fisicoquímicos, pero al presente se le ocupa también con un significado más amplio para abarcar un mayor número de ciencias (Abejez, 2012; Montero *et al.*, 2007; Pollard *et al.*, 2017; Tenorio y Méndez-Garrido, 2004; Vieira y Coelho, 2012).

En lo referente a la química analítica, del empleo de técnicas espectroscópicas y cromatográficas para la identificación de materiales orgánicos en vestigios arqueológicos se ha consolidado una disciplina conocida como «análisis de residuos orgánicos», en la cual el trabajo de analistas químicos y arqueólogos se complementa mutuamente para acrecentar nuestro conocimiento acerca de la vida cotidiana en civilizaciones antiguas (Evershed, 2008b). En México, el Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural, sede Instituto de Química (LANCIC-IQ, UNAM) lleva a cabo proyectos comprendidos dentro de dicha materia, ya sea desarrollando métodos para implementarse en el estudio del patrimonio cultural (Cruz, 2019; Iturbe, 2022), caracterizando productos naturales y su envejecimiento (Campos, 2022; Guzmán, 2022;) o directamente examinando muestras arqueológicas (Chávez, 2019; Reyes, 2022).

Actualmente, LANCIC-IQ colabora en una investigación cuyo objetivo es determinar la función de piezas arqueológicas encontradas en diferentes sitios de Veracruz, hoy en día ubicadas en el Museo de Antropología de Xalapa (MAX), que

INTRODUCCIÓN

por sus características físicas se intuye fueron usadas como quemadores de copal. El interés en este tema nació gracias a la tesis de doctorado (en prensa) que lleva por nombre «Análisis de los quemadores de incienso del Centro de Veracruz», de la Maestra en Estudios Mesoamericanos Rocío Velasco Fuentes, quien está trabajando con estos artefactos pertenecientes a una civilización precolombina poco conocida y escasamente estudiada: la cultura del centro de Veracruz.

En este contexto, surge la necesidad de establecer métodos que permitan identificar restos de copal en objetos hipotéticamente empleados para quemar estas resinas. Así pues, se realizó un acercamiento a esta cuestión utilizando técnicas instrumentales para analizar las piezas provenientes de Nopiloo, Veracruz, contempladas en el referido trabajo de posgrado; en esta publicación se exponen los pormenores y resultados, no sin antes ofrecer un contexto tanto químico como histórico para mejorar su comprensión.



Fig. 0.1. *Ideograma de copal en el código Mendoza.* Tomado de Blancas *et al.* (2022).

HIPÓTESIS

Usando espectroscopía de infrarrojo y cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas, es posible detectar marcadores químicos en muestras de piezas arqueológicas para aportar evidencia de su supuesto uso como quemadores de copal.

OBJETIVOS

Objetivo general.

Analizar muestras de piezas arqueológicas mediante espectroscopía de infrarrojo (FTIR) y cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG-EM) para buscar indicios de la quema de copal en su interior.

Objetivos particulares.

- Examinar las muestras y sus extractos usando espectroscopía de infrarrojo para verificar la presencia de material orgánico resinoso.
- Reconocer a los compuestos orgánicos presentes en las muestras, analizando sus extractos con cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas para buscar biomarcadores de copal.
- Proponer un protocolo de análisis para la identificación de copal en piezas arqueológicas, empleando espectroscopía de infrarrojo y cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas.

ANTECEDENTES

1.1 Cultura del centro de Veracruz

La cultura del centro de Veracruz se desarrolló desde el Preclásico tardío hasta finales del Clásico (400 a. C. a 1200 d. C.) en la zona mesoamericana de la Costa del Golfo. Al territorio ocupado por este pueblo se le dividió para su estudio en dos áreas: la Centro Norte y la Centro Sur; dentro de la meridional se ubica la Mixtequilla, una región que comprende la parte oeste de la cuenca baja del río Papaloapan. Entre los sitios arqueológicos pertenecientes a esta subárea se encuentran Nopiloa, El Zapotal y Los Azuzules (Figura 1.1) (Daneels, 2002; Reyes, 2014; Stark y Curet, 1994).

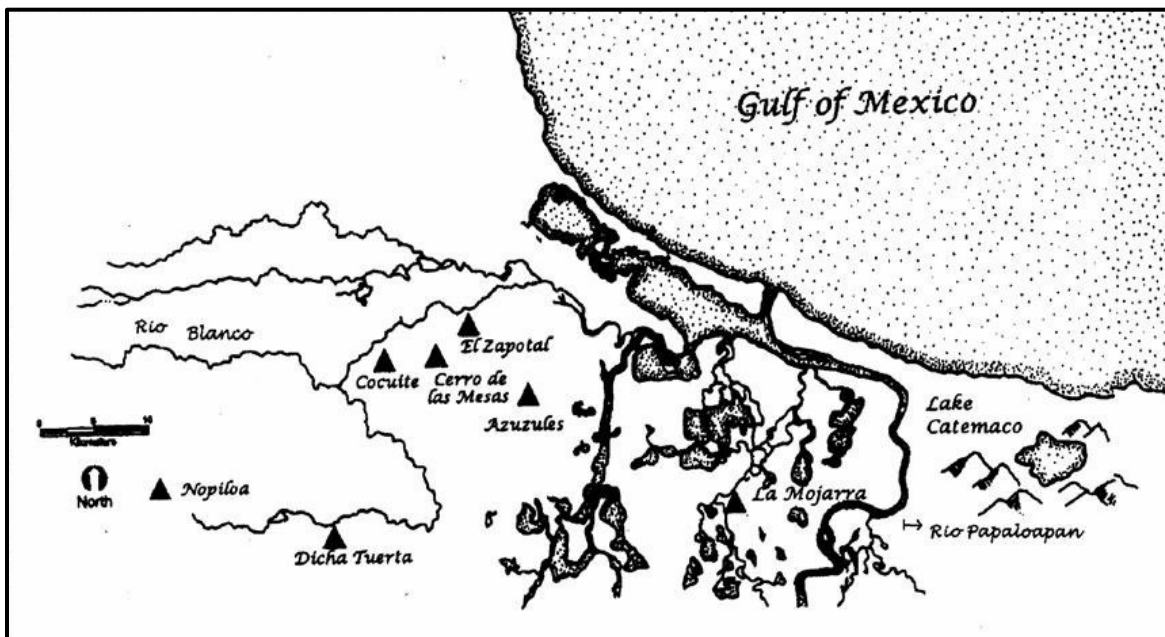


Fig. 1.1. *Región la Mixtequilla-Tuxtlas*. Tomado de Wyllie (2010).

ANTECEDENTES

Una singularidad del Centro Sur fue la fabricación de figurillas sonrientes (Figura 1.2): esculturas antropomorfas de barro con expresión sonriente, las cuales, a diferencia de otras producciones mesoamericanas, muestran una emoción (Reyes, 2014; Uriarte, 1986). Asimismo, a esta cultura se le ha relacionado fuertemente con el juego de pelota prehispánico, pues se le atribuye la creación de un ritual de sacrificio ligado a este deporte cuyas implicaciones tuvieron alcances sociales, políticos y religiosos; sin dejar de lado que la región donde floreció destaca entre otras de Mesoamérica por la abundancia de canchas destinadas a dicha actividad (Daneels, 2017).



Fig. 1.2. Caritas sonrientes expuestas en el Museo Nacional de Antropología, Ciudad de México. Archivo personal del autor.

Por la falta de sitios de grandes dimensiones, los arqueólogos no han mostrado mucho interés en esta cultura, además se ha visto relegada frente a la Olmeca, la cual se desarrolló en la misma zona, porque a esta última se le considera de mayor importancia en la historia mesoamericana. No obstante, realizar investigaciones encaminadas a aumentar el conocimiento relativo a la cultura del centro de Veracruz contribuirá a mejorar nuestra comprensión del México prehispánico (Arnold, 1994; Daneels, 2002; Stark, 2022).

ANTECEDENTES

1.1.1 Nopiloa

Este sitio arqueológico, cuyo nombre probablemente es un derivado del vocablo náhuatl *No Pilli Wan*, traducido como «mis hijitos» o «mis príncipes» (Navarrete, 1987), se localiza en el municipio de Tierra Blanca, Veracruz, a orillas del río Guerengo (Figura 1.3). Comenzó a existir como un asentamiento dependiente del Cerro de las Mesas a principios del periodo Clásico (300 d. C.). Durante algún tiempo entre los años 600 y 900 d. C. alcanzó su máximo esplendor, convirtiéndose en un centro independiente con poder sobre otros. Sin embargo, esto no fue obstáculo para su posterior abandono a finales del Clásico (1200 d. C.) por razones aún desconocidas (Stark, 2010, 2022).



Fig. 1.3. *Ubicación de Nopiloa.* Elaborado con Google Maps.

A principios del siglo XX, dos esculturas de esta zona fueron transportadas al Museo Nacional de Antropología (Medellín, 1960). En 1957 se informó al Instituto

ANTECEDENTES

de Antropología de la Universidad Veracruzana, cuya dirección ocupaba el arqueólogo Alfonso Medellín Zenil, sobre la extracción clandestina de unas piezas arqueológicas de Nopiloa, mismas que fueron decomisadas por el Escuadrón montado de las Fuerzas de Seguridad Pública del Estado y entregadas a aquella institución. Después de examinarlas, se llevó a cabo un trabajo de reconocimiento del lugar en cuestión (Figura 1.4), seguido de dos excavaciones dirigidas por Medellín Zenil, una en el mismo año y otra en 1958 (Medellín, 1987).

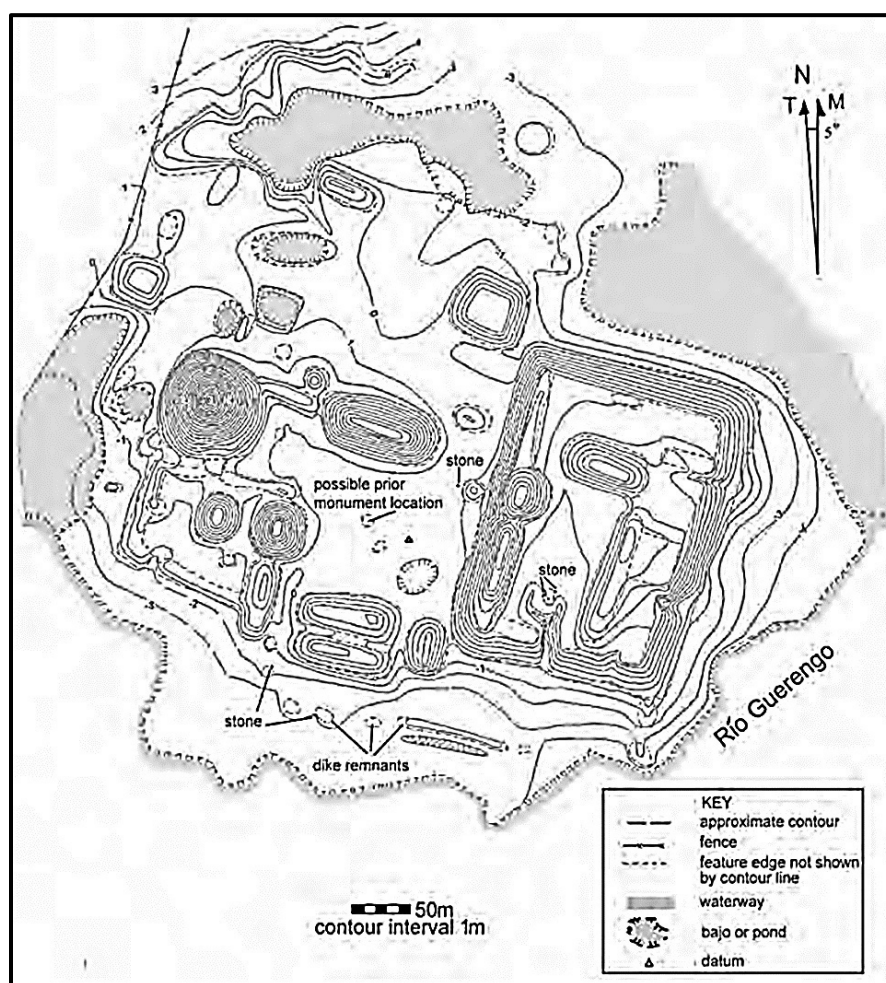


Fig. 1.4. Plano de isolíneas de Nopiloa. Tomado de Stark (2022).

ANTECEDENTES

El resultado de los trabajos descritos fue la recuperación de una cantidad considerable de objetos que va desde instrumentos musicales como silbatos, flautas y sonajeros; pasando por cajetes, quemadores de copal y figurillas hechas con barro o piedra; hasta esculturas de más de un metro de altura (Medellín, 1987). Actualmente muchas de estas piezas se encuentran en el Museo de Antropología de Xalapa (MAX). Algunas de ellas, inicialmente catalogadas como de procedencia desconocida, han sido relacionadas con Nopiloa gracias a la labor de la Maestra Rocío Velasco Fuentes, quien logró su identificación revisando los documentos de las excavaciones.

1.2 Los quemadores de copal prehispánicos

Los quemadores de copal, encontrados en sitios a lo largo de toda Mesoamérica, son contenedores donde se encendía fuego para quemar diversos materiales. Según indica la evidencia, fueron usados desde el Preclásico (2000 a. C. a 100 d. C.) principalmente para la producción de humo de copal, pues se consideraba a este como el medio a través del cual se podía establecer comunicación con las deidades, pero también servían como fuentes de luz o calor. De acuerdo con sus rasgos físicos, estos artefactos se clasifican como incensarios, anafres, candeleros, braseros o sahumadores (Velasco, 2014).

En Nopiloa, Medellín (1987) reportó el hallazgo de quemadores tipo brasero y sahumador, únicamente. Los primeros son vasijas con forma cilíndrica o bicónica, no tienen efigies, pero pueden estar decorados con púas u otros elementos y algunos se colocaban sobre pedestales; están diseñados para permanecer fijos en un lugar. Por otro lado, los sahumadores, incensarios de cucharón o *tléimatl* «manos de fuego», constan de una cazoleta donde se depositan las brasas y un mango de donde se sostienen para trasladarlos mientras se incienca (Figura 1.5) (García, 2015; Velasco, 2014).

ANTECEDENTES

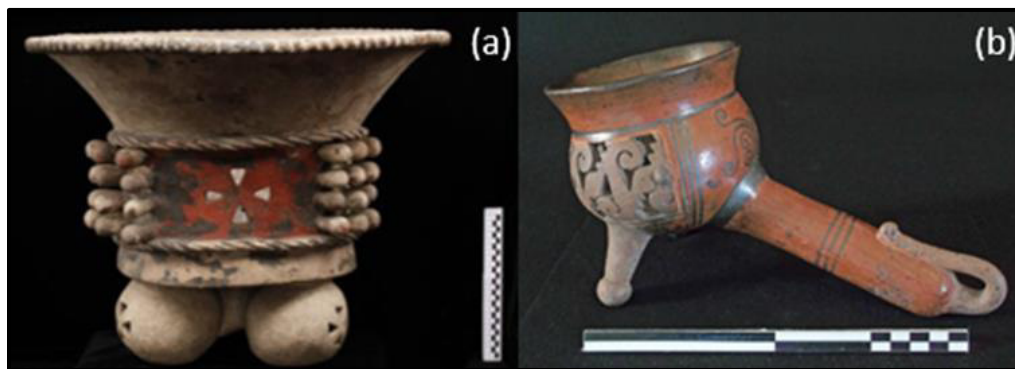


Fig. 1.5. Quemadores de copal tipo (a) brasero y (b) sahumador. Tomados de Mediateca INAH¹.

Personajes como fray Bernardino de Sahagún, fray Diego Durán y Fernando Alvarado Tezozómoc registraron en sus escritos la quema de copal durante las ceremonias de los mexicas; una costumbre practicada por los pueblos prehispánicos en general (Núñez, 2019), los cuales celebraban numerosos rituales como parte de sus actividades religiosas, civiles y militares, cada uno con un propósito específico, en ellos era común sahumar personas, lugares u objetos (Figura 1.6). En ocasiones, también se colocaba en el quemador alguna ofrenda: las más comunes eran hule, papel, flores (en especial pericón o *yauhtli*, *Tagetes lucida*) y sangre de animales o de autosacrificio (Montúfar, 2016; Ruiz, 2010; Velasco, 2014).

¹ Brasero: <https://mediateca.inah.gob.mx/repositorio/islandora/object/objetoprehispanico%3A16527>
Sahumador: <https://mediateca.inah.gob.mx/repositorio/islandora/object/objetoprehispanico%3A1448>



Fig. 1.6. *Representación de una persona sahumando, Códice Durán.* Adaptado de Durán (1579).

1.3 El copal

La palabra copal es un derivado del náhuatl *copalli*, que significa «incienso» (Gigliarelli *et al.*, 2015) o «resina» (Montúfar, 2007), así se nombraba a los exudados olorosos de múltiples especies de árboles, y a estos se les conocía genéricamente como *copalquáhuil* «árbol de copal» (Hernández, 1943; Linares y Bye, 2008). Actualmente, este vocablo se usa no solo para las resinas obtenidas de taxones nativos de México, sino también para las de otros lugares del mundo, como sucede con el copal de Manila o el copal de Zanzíbar (Montúfar, 2015).

Al igual que otras resinas vegetales, los diversos tipos de copal son insolubles en agua y cuando se queman producen humo aromático. Recién manados son líquidos traslúcidos altamente viscosos, pero con el paso del tiempo se vuelven sólidos rígidos y quebradizos, habitualmente amarillentos (Figura 1.7), con puntos de fusión relativamente altos (Lucero-Gómez *et al.*, 2014a; Martín-Ramos *et al.*, 2018). Sus características físicas no solo dependen de la especie de la cual se cosecha, sino también de cómo se efectúa este proceso (García, 1981; Linares y Bye, 2008).

ANTECEDENTES

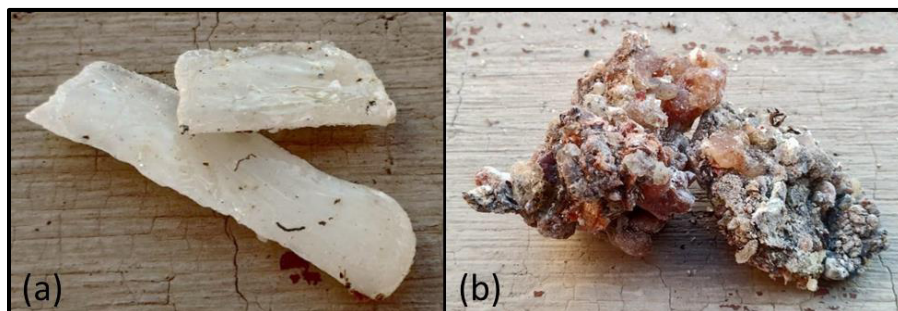


Fig. 1.7. (a) «Copal blanco» y (b) «copal negro», resinas contemporáneas. Archivo personal del autor.

El copal cumple la función de ayudar a sanar las heridas de la planta y evitar que en ellas crezcan microorganismos, por eso cuando hay una abertura en la corteza comienza a fluir hacia el exterior. La extracción de esta resina se lleva a cabo haciendo cortes perpendiculares en las ramas o troncos de una especie productora, desde donde cae a un contenedor previamente dispuesto (Figura 1.8). Es imprescindible dar a estas incisiones la debida profundidad, separación, longitud y espaciamiento temporal; de lo contrario, el ejemplar podría morir. (Abad-Fitz *et al.*, 2020; Montúfar, 2016; Purata, 2008).



Fig. 1.8. Extracción de copal de *B. bipinnata*. Adaptado de Abad-Fitz *et al.* (2020).

1.3.1 Origen botánico

Las especies nativas de México cuyas resinas se han considerado históricamente como copal pertenecen a la familia *Burseraceae*, abarcando varias del género *Bursera* (*B. bipinnata*, *B. copallifera*, *B. linanoe*, entre otras) y una del *Protium* (*P. copal*) (Figura 1.9) (Case *et al.*, 2003; Gigliarelli *et al.*, 2015; Martínez, 2022).

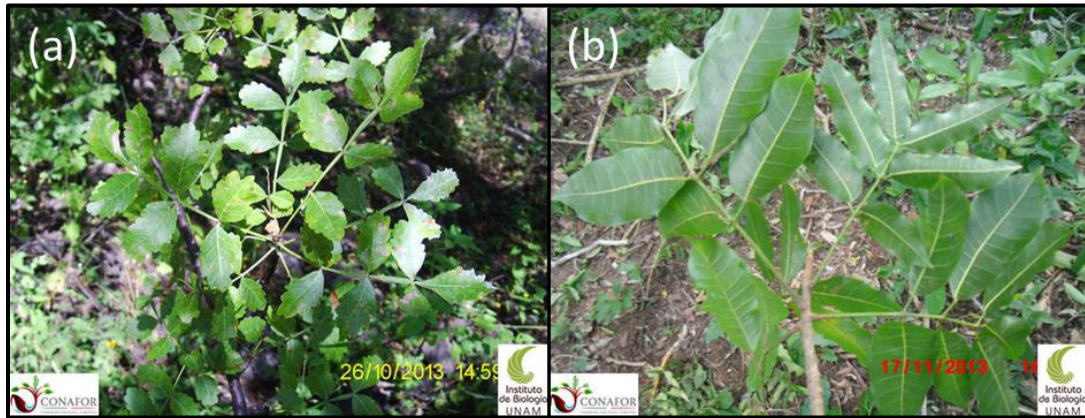


Fig. 1.9. Ejemplares de (a) *B. linanoe* y (b) *P. copal*. Tomados de Irekani, Instituto de Biología, UNAM².

De acuerdo con Rzedowski *et al.* (2004), el *Códice De la Cruz-Badiano* (1552) de Martín de la Cruz (Figura 1.10) y *Nova plantarum animalium et mineralium Mexicanorum historia* (1651) de Francisco Hernández de Toledo son las primeras referencias científicas de las *Bursera*. Asimismo, en esa publicación y una posterior (Rzedowski, 2015), se señala a los más de cien árboles y arbustos *Bursera* como endémicos de América, de donde México destaca por tener la mayor diversidad: reportan que en 2013 se tenían ubicadas 89 especies en territorio mexicano.

² *B. linanoe*: <http://unibio.unam.mx/irekani/handle/123456789/49509?proyecto=Irekani>
P. copal: <http://unibio.unam.mx/irekani/handle/123456789/43551?proyecto=Irekani>



Fig. 1.10. Ilustración del «Tzihuaccopalli», *Códice De la Cruz-Badiano*. Adaptado de Mediateca INAH³.

Los *Protium*, con alrededor de 90 especies distribuidas en Asia, América y Madagascar, limitan su presencia en México a solo tres (Case *et al.*, 2003; Rzedowski y Calderón, 1996). Mientras los *Protium* se encuentran únicamente en los estados de Veracruz, Oaxaca y el sureste mexicano (Case *et al.*, 2003; Rzedowski, 2006), los *Bursera* se localizan en la mayoría del territorio nacional: desde los sectores australes de Sonora, Chihuahua, San Luis Potosí y Tamaulipas hasta Chiapas y la península de Yucatán (Rzedowski, 2006; Rzedowski *et al.*, 2004), e incluso en el sur de la península de Baja California (León y Pérez-Navarro, 2010; León *et al.*, 2017).

1.3.2 Composición química

El copal está constituido por una mezcla de metabolitos secundarios, o sea, no esenciales para el desarrollo de las plantas, principalmente terpenos y algunos compuestos fenólicos (Ávalos y Pérez-Urria, 2009; Blancas *et al.*, 2022; Gigliarelli *et al.*, 2015). Según diversos estudios, en los inciensos de ejemplares de *Bursera* y

³ <https://www.mediateca.inah.gob.mx/repositorio/islandora/object/codice:851#page/1/mode/2up>

ANTECEDENTES

Protium, los monoterpenos y sesquiterpenos forman la fracción volátil, a su vez, la no volátil está compuesta por triterpenos y, a menudo, también lignanos. Por lo tanto, el copal queda comprendido dentro de las resinas triterpénicas, pues difícilmente se encuentran tanto diterpenos como triterpenos en una misma resina vegetal, por eso se dividen en diterpénicas y triterpénicas (Colombini y Modugno, 2009).

Los terpenos o isoprenoides son un tipo de biomoléculas sintetizadas mediante la polimerización del isopentenil difosfato y, su isómero, el dimetilalil difosfato (Figura 1.11); algunos de ellos poseen grupos hidroxilo o carbonilo. Según el número de carbonos en su estructura molecular, se clasifican en hemiterpenos (5 átomos), monoterpenos (10 átomos), sesquiterpenos (15 átomos), diterpenos (20 átomos), triterpenos (30 átomos), etcétera (Azcón-Bieto y Talón, 2013).

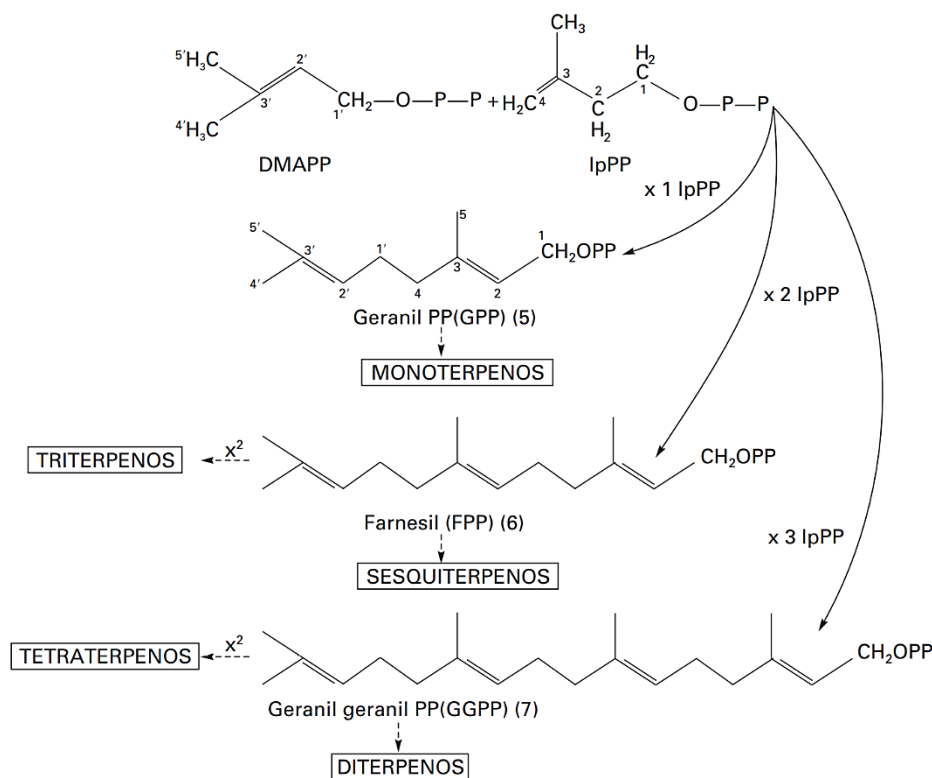


Fig. 1.11. Biosíntesis de cadenas terpénicas a partir de dimetilalil difosfato (DMAPP) e isopentenil difosfato (IpPP). Tomado de Azcón-Bieto y Talón (2013).

ANTECEDENTES

En el perfil químico de copales de especies *Bursera*, la parte monoterpénica es muy variada, por otro lado, la sesquiterpénica es escasa o nula. En estas categorías hay compuestos monocíclicos, como el limoneno, el 4-terpineol y el germacreno D; pero también bicíclicos, como el α -pineno, el canfeno y el cis-calameneno (Figura 1.12) (Blancas *et al.*, 2022; De la Cruz-Cañizares *et al.*, 2005; Gigliarelli *et al.*, 2015).

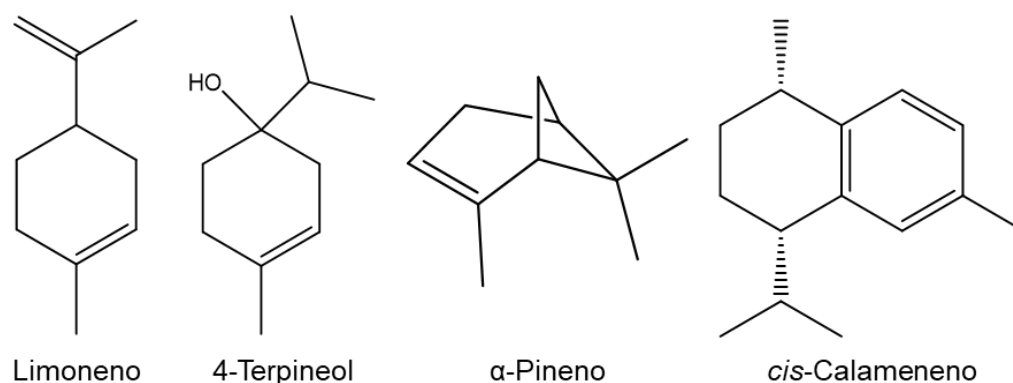


Fig. 1.12. Ejemplos de monoterpenos y sesquiterpenos del copal.

La mayoría de los triterpenos presentes en los copales referidos son pentacíclicos, entre ellos están las amirinas, las amironas, el lupeol, la lupenona y el hopenol B; sin embargo, también se han detectado otros compuestos con menos anillos, como la mansumbinona y el malabaricatrienol. De todas estas especies químicas enunciadas, destacan las derivadas del ursano, el oleanano y el lupano (Figura 1.13), por su considerable abundancia y extendida presencia en las resinas de plantas *Bursera* y *Protium*. (De la Cruz-Cañizares *et al.*, 2005; Frondel, 1969; Gigliarelli *et al.*, 2015; Lucero-Gómez *et al.*, 2014b; Merali, 2018; Romero-Estrada *et al.*, 2016; Stacey *et al.*, 2006).

ANTECEDENTES

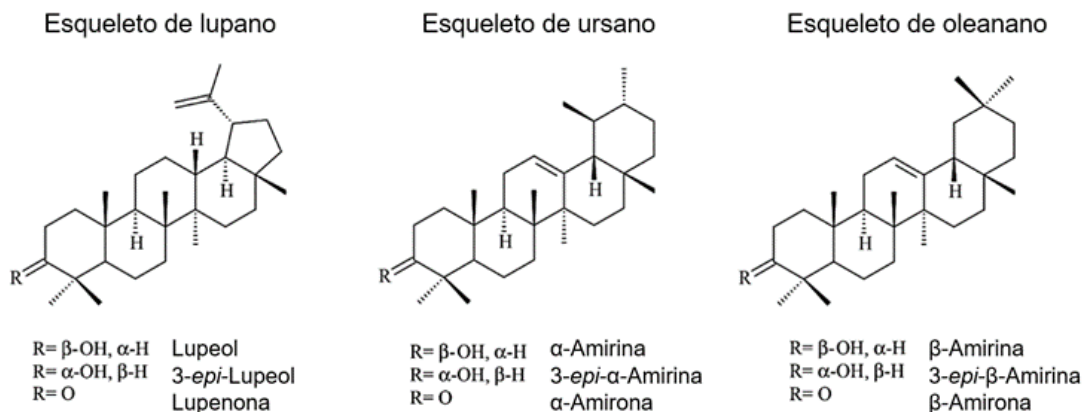


Fig. 1.13. Principales triterpenos del copal. Adaptado de Gigliarelli *et al.* (2015).

Los lignanos son compuestos fenólicos ampliamente reconocidos por su actividad biológica, se sintetizan a partir de la dimerización de fenilpropanoides y su posterior oxidación en distintos grados (Koulman, 2003; Marcotullio *et al.*, 2018; Suzuki y Umezawa, 2007). Ejemplos de lignanos extraídos de resinas de *Bursera* son la burseranina, la morelensina (Figura 1.14), el diacetato de dihidroclusina y la picropoligamina (Messina *et al.*, 2015; Morales-Serna *et al.*, 2013; Peraza-Sánchez y Peña-Rodríguez, 1992; Velázquez-Jiménez *et al.*, 2011). Asimismo, se ha informado de la identificación de flavonoides, saponinas y polisacáridos en los copales de algunas especies. (Díaz, 2015; Lucero-Gómez *et al.*, 2014b).

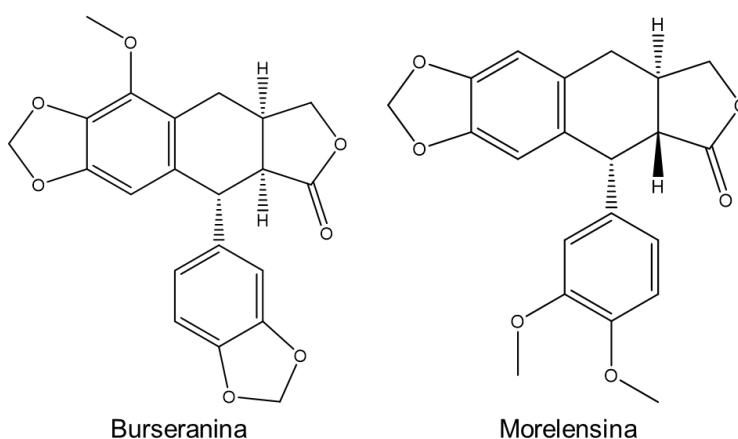


Fig. 1.14. Dos lignanos encontrados en resinas de especies *Bursera*.

1.3.3 Usos

Gracias a su disponibilidad y versatilidad, a lo largo de la historia las resinas vegetales han sido ampliamente utilizadas alrededor del mundo con propósitos muy variados (Colombini y Modugno, 2009). En cuanto al copal, sus usos han tenido fines medicinales, rituales y artísticos. A continuación se enumeran algunos ejemplos, tanto prehispánicos (a) como los actuales (b), de cada categoría:

1. Medicinales

(a) En infusiones para tratar la tos, bronquitis y reumatismo; como analgésico o para limpiar heridas (Romero-Estrada *et al.*, 2016). A modo de cataplasma para combatir infecciones en la piel (Lucero, 2012). Posiblemente como adhesivo en incrustaciones dentales (Figura 1.15) (Orta-Amaro *et al.*, 2005).



Fig. 1.15. *Incrustaciones dentales mayas.* Archivo personal del autor.

(b) Para el tratamiento de la dermatitis provocada por los urushioles del exudado del chechén negro (*Metopium brownei*) (Anaya *et al.*, 1999; Castillo, 2016). En forma de cataplasma para desinflamar (Jiménez, 2012). Como descongestionante nasal y cicatrizante (Téllez *et al.*, 2009).

ANTECEDENTES

2. Rituales

(a) Como material moldeable para la elaboración de figurillas (Figura 1.16) (Lucero, 2012). Depositado en templos o cenotes a manera de ofrenda (Stacey *et al.*, 2006). Como incienso en contextos públicos o privados (Lona, 2004).



Fig. 1.16. *Figurillas aztecas fabricadas con copal.* Archivo personal del autor.

(b) Para producir el particular humo bienoliente en ceremonias con raíces prehispánicas (Lucero, 2012; Montúfar, 2016).

3. Artísticos

(a) Como pegamento en mosaicos (Figura 1.17) (Stacey *et al.*, 2006). Para trabajos de orfebrería (Lucero, 2012). Como sellador en murales (Stross, 1997).



Fig. 1.17. Mosaico prehispánico elaborado con resina de *Burseraceae* como adhesivo.

Tomado de Stacey *et al.* (2006).

- (b) Mezclado con ceras, aceites secantes u otras resinas para fabricar aglutinantes pictóricos (De la Cruz-Cañizares *et al.*, 2005).

La aplicación del copal en la medicina tradicional ha llamado la atención de la comunidad científica, por ello se empezaron a hacer investigaciones para evaluar las propiedades curativas de las resinas, cortezas y hojas de plantas *Bursera* (Acevedo *et al.*, 2015; Antúñez-Mojica *et al.*, 2021; Blancas *et al.*, 2022; Gigliarelli *et al.*, 2015; Murillo-Alvarez *et al.*, 2001; Salinas *et al.*, 2009). En sus extractos se han encontrado compuestos con atributos antiinflamatorios, citotóxicos y antibióticos, por mencionar algunos (Jolad *et al.*, 1977; Marcotullio *et al.*, 2018; Peña-Morán *et al.*, 2016; Romero-Estrada *et al.*, 2016). Lucero (2012) y Montúfar (2007) también señalan su aprovechamiento para la manufactura de cosméticos, adhesivos, jabones, barnices, pinturas, aceites esenciales, etcétera.

1.4 Análisis de residuos orgánicos

En arqueometría, se denomina residuo orgánico a cualquier conjunto de compuestos orgánicos hallados en patrimonio arqueológico, depositados en él a

ANTECEDENTES

causa de la utilización de materiales naturales (como el copal) en las actividades cotidianas de civilizaciones antiguas. Los rastros de estas sustancias pueden encontrarse en objetos con los cuales estuvieron en contacto; por ejemplo, en cerámica, contenedores de vidrio o metal, e inclusive suelo y sedimento; también se sabe de residuos orgánicos que se han conservado solos (restos vegetales, animales y humanos) o formando parte de algún bien, como en obras de arte y textiles (Evershed, 2008b; Pecci, 2014).

Por ejemplo, durante las excavaciones en el sitio arqueológico de Oplontis (Nápoles, Italia) se encontraron una serie de recipientes de vidrio (Figura 1.18), en cuyo interior se conservó una porción de su contenido original en forma de sólidos amorfos color café negruzco. Por medio de la aplicación de técnicas instrumentales para el análisis de estos remanentes, se detectaron en ellos diterpenos derivados del ácido dehidroabiético, ésteres de cadena larga de ácido palmítico y fitoesteros; indicadores de resinas de pináceas, cera de abeja y ceras vegetales, respectivamente. En vista de lo anterior, se sospecha que estos residuos orgánicos son producto de la combinación de dichas materias primas para la preparación de cosméticos (Ribechini *et al.*, 2008).



Fig. 1.18. *Unguentaria romana hallada en Oplontis, Italia.* Tomado de Ribechini *et al.* (2008).

ANTECEDENTES

La composición química de un residuo orgánico depende de los materiales a partir de los cuales se formó, de las alteraciones ocasionadas por humanos, de las características de la matriz, así como de las condiciones ambientales antes y después del descubrimiento de la pieza arqueológica, entre ellas: la temperatura, la exposición a la luz y las condiciones redox. Del mismo modo, la supervivencia de un residuo orgánico, es decir, si logra preservarse o no, está determinada por los factores previamente mencionados (Colombini *et al.*, 2005; Eglinton y Logan, 1991; Stacey, 2009).

La caracterización de un residuo orgánico mediante técnicas instrumentales, conocida como análisis de residuos orgánicos, permite conocer su origen, para ello se busca entre sus componentes a los biomarcadores, o sea, compuestos químicos, estables o formados al pasar del tiempo, intrínsecamente relacionados con los materiales implicados en la conformación del residuo, las modificaciones antrópicas o el envejecimiento (Heron y Evershed, 1993; Pecci, 2021). Evershed (2008b) sugiere el concepto de «biomarcador arqueológico» para designar a las especies químicas encontradas en residuos orgánicos que proveen información acerca de las actividades humanas en el pasado.

El análisis de residuos orgánicos de Correa-Ascencio *et al.* (2014) a fragmentos de vasijas teotihuacanas reveló la presencia de hopanoides atribuibles a la isomerización y desfuncionalización de moléculas como el bacteriohopanotetrol (BHT) (Figura 1.19), mismas que abundan en la membrana celular de la bacteria *Zymomonas mobilis*. Aludiendo el uso de dicho microorganismo para la fermentación del pulque y adjudicando las transformaciones químicas mencionadas al calentamiento durante la elaboración de la bebida, a las propiedades catalíticas del barro y a la acción microbiana; los autores presentaron sus resultados como evidencia de la preparación de pulque en Mesoamérica.

ANTECEDENTES

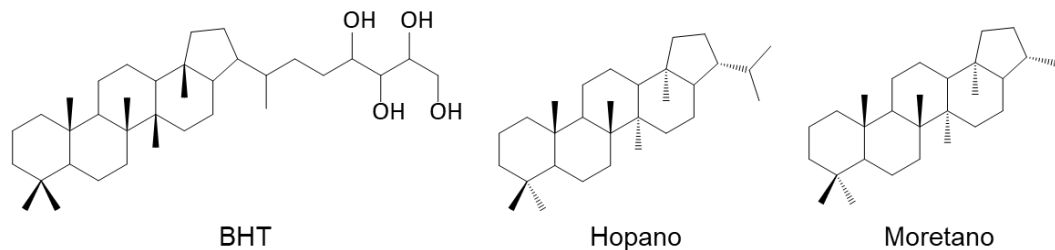


Fig. 1.19. *Bacteriohopanotetrol (BHT) y dos hopanoides encontrados en vasijas teotihuacanas.*

Las cerámicas arqueológicas son una de las fuentes de residuos orgánicos más importantes por la relevancia de la información que proporcionan, así como por su presencia extendida en el mundo. En ellas los residuos orgánicos pueden perdurar, principalmente, en tres formas: rellenos de vasijas (muy raros), residuos superficiales visibles y residuos adsorbidos invisibles para el ojo humano (el más común) (Evershed, 2008a; Roffet-Salque *et al.*, 2017; Stacey, 2009).

Mediante el análisis de residuos orgánicos en cerámicas prehispánicas, utilizando a la teobromina (Figura 1.20) como biomarcador, investigaciones como las de Hurst *et al.* (2002), Kaplan *et al.* (2017) y Powis *et al.* (2011) han podido demostrar el aprovechamiento del cacao (*Theobroma cacao*) para la preparación de alimentos en las culturas olmeca y maya, con lo cual también se comprueba la existencia de esta práctica en Mesoamérica desde hace alrededor de 4000 años.

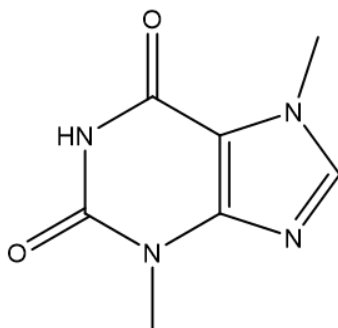


Fig. 1.20. *Teobromina, biomarcador arqueológico de consumo de cacao.*

ANTECEDENTES

Según los objetivos planteados, así como los rasgos del bien cultural estudiado, para el análisis de residuos orgánicos se utiliza la espectroscopía, la espectrometría de masas y la cromatografía (Evershed, 2008b; Pecci, 2014). De la primera técnica sobresalen la espectroscopía Raman y la de infrarrojo, basadas en la detección de grupos funcionales, se aplican para examinar a la muestra en su conjunto y obtener una descripción general de ella. Los casos donde se puede determinar el origen de un residuo con sus resultados son escasos. Igualmente, sirven para estudiar los efectos del envejecimiento en las estructuras químicas de los materiales. (Monnier, 2018; Peris, 2007).

La espectrometría de masas se emplea en dos modalidades diferentes: introduciendo la muestra directamente en el equipo o acoplada a alguna técnica cromatográfica. En ambos casos se busca usar la información estructural que proporciona para identificar compuestos relacionados con la procedencia y proceso de formación de un residuo orgánico (Madariaga, 2015; Regert y Rolando, 2002).

Muchas veces la complejidad de los residuos orgánicos hace necesario el uso de la cromatografía para separar a las especies químicas que los constituyen. Al acoplar la cromatografía con la espectrometría de masas se consigue combinar las características de las dos técnicas para la identificación, caracterización y cuantificación de analitos individualmente (Madariaga, 2015; Peris, 2007).

1.4.1 Materiales orgánicos en arqueología

Los residuos orgánicos pueden formarse a partir de una gran variedad de productos, a los cuales Colombini y Modugno (2009) agruparon, junto a los materiales orgánicos empleados en el arte, en ocho clases: proteínas, glicerolípidos, ceras naturales, resinas naturales, polisacáridos, materiales bituminosos, colorantes orgánicos y polímeros sintéticos. No obstante, los polímeros sintéticos no son de interés arqueológico porque, como mencionan las autoras, estos se comenzaron a producir hasta la segunda mitad del siglo XIX. A continuación, se

ANTECEDENTES

presenta una breve descripción de cada categoría con algunos ejemplos, así como sus principales usos (Colombini y Modugno, 2009):

1. **Proteínas:** Macromoléculas formadas de la unión de varios aminoácidos mediante enlaces peptídicos. Las hay de origen animal (huevo, cola y lana), vegetal (ajo y frijoles) y humano (tejido). Usadas como aglutinantes, adhesivos, textiles, materia prima o pergaminos.

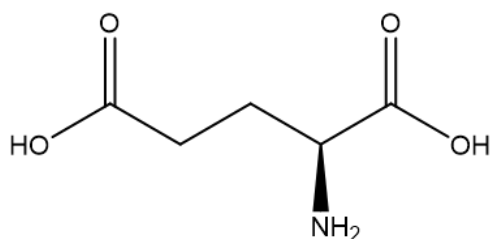


Fig. 1.21. *Ácido glutámico, aminoácido más abundante en la clara y yema de huevo.*

2. **Glicerolípidos:** Mezclas de ésteres de glicerol con ácidos grasos (triglicéridos o triacilgliceroles) y algunas otras sustancias como esteroides. Entre ellos están las grasas animales, los aceites vegetales (de palma y de oliva) y los aceites secantes (de linaza y de nuez). Usados como aglutinantes, barnices o ingredientes de cosméticos y preparaciones farmacéuticas.

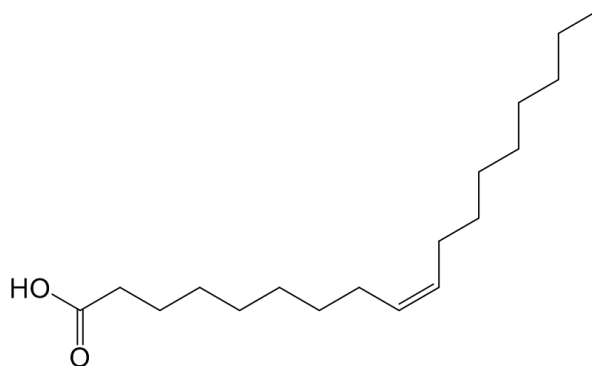


Fig. 1.22. *Ácido oleico, principal ácido graso del aceite de oliva.*

ANTECEDENTES

3. Ceras naturales: Sólidos altamente hidrofóbicos, formados por ésteres de alcoholes grasos con ácidos carboxílicos de cadena larga. Las hay de origen animal (cera de abeja y lanolina), vegetal (carnaúba y cera japonesa) y fósiles (cera montanesa). Usadas como ingredientes de cosméticos y preparaciones farmacéuticas, aglutinantes, tablillas para escribir, selladores o en esculturas.

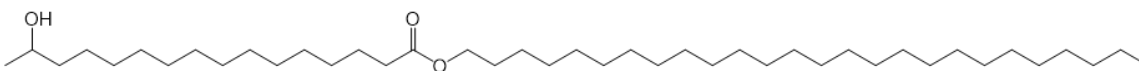


Fig. 1.23. *Hexacosanil 15-hidroxi palmitato, biomarcador de cera de abeja.*

4. Resinas naturales: Constan de varios terpenoides, tanto volátiles como no volátiles, y ocasionalmente de compuestos fenólicos. Se obtienen directamente de plantas (mástique, copal, mirra e incienso) y animales (goma laca) o por tratamiento térmico de corteza de árboles (alquitrán y brea). Usadas como barnices, recubrimientos, impermeabilizantes, aglutinantes o ingredientes de cosméticos y preparaciones farmacéuticas.

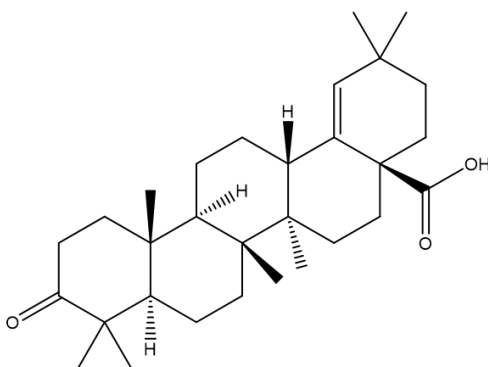


Fig. 1.24. *Ácido morónico, triterpeno propio de resinas vegetales de especies Pistacia.*

5. Polisacáridos: Polímeros de carbohidratos simples unidos por enlaces glicosídicos. Por ejemplo, almidón, celulosa y gomas de plantas (arábica, tragacanto y karaya). Usados como papel, aglutinantes o adhesivos.

ANTECEDENTES

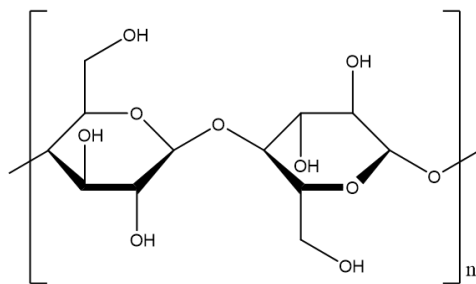


Fig. 1.25. Celulosa, polímero estructural de las plantas.

6. Materiales bituminosos: Son producto de la fragmentación de terpenos y fitoesteroles, también pueden contener alcanos lineales. Representados por el asfalto y el bitumen. Usados como adhesivos, pigmentos o materiales de modelado.

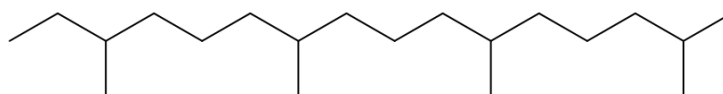


Fig. 1.26. Fitano, componente del bitumen.

7. Colorantes orgánicos: Pueden ser flavonoides, galotaninos, carotenoides, benzoquinonas, antocianidinas, así como moléculas derivadas de la antraquinona o del índigo. Entre ellos están la grana cochinilla, el azafrán, el índigo, el quermes y los colorantes sintéticos. Usados como pigmentos.

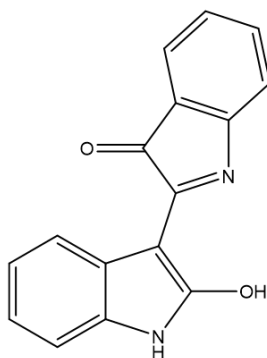


Fig. 1.27. Indirubina, colorante natural de plantas del género *Indigofera*.

1.5 Análisis químicos de copal prehispánico y contemporáneo

En la Tabla 1.1 se enlistan algunos trabajos donde se estudian estándares de copal con técnicas instrumentales para posteriormente aplicar sus resultados en investigaciones arqueológicas. Cabe señalar que a la fecha de la redacción de esta sección no se encontraron publicaciones, aparte de las realizadas por LANCIC-IQ, donde se inspeccionaran muestras de patrimonio cultural relacionadas con copal quemado.

Tabla 1.1. Ejemplos de análisis químicos de copal prehispánico y estándares.

Nombre del documento	Materiales analizados	Técnicas utilizadas	Referencia
Análisis de biomarcadores de copal mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas en piezas arqueológicas del centro de Veracruz	Muestras de barro de piezas prehispánicas	Espectroscopía de infrarrojo	Reyes (2022)
	Resina de <i>Bursera bipinnata</i> (antes y después de su combustión)	Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas	
Estudio físico-químico del deterioro de los objetos arqueológicos de copal del Nevado de Toluca	Copal arqueológico sin quemar	Espectroscopía Raman	Ramírez <i>et al.</i> (2021)
	Resina certificada de <i>Bursera bipinnata</i>	Espectroscopía de infrarrojo	
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	Ofrenda prehispánica de copal en un cerámico	Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas	Díaz (2016)
	Copales comerciales contemporáneos		

ANTECEDENTES

Tabla 1.1. Ejemplos de análisis químicos de copal prehispánico y estándares.

(continuación)

Nombre del documento	Materiales analizados	Técnicas utilizadas	Referencia
Chemical analysis of resinous materials employed in artistic pre-Hispanic Mexico: application to aztec and maya archaeological samples	Ofrendas prehispánicas de copal sin quemar	Espectroscopía de infrarrojo	Lucero (2012)
	Resinas certificadas de especies de <i>Bursera</i>	Cromatografía de líquidos de alta eficiencia	
	Copales comerciales contemporáneos	Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas	
Chemical characterization of ancient Mesoamerican 'copal' resins: preliminary results	Adhesivos de mosaicos prehispánicos	Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas	Stacey <i>et al.</i> (2006)
	Resinas de referencia de especies de <i>Bursera</i> , <i>Pinus</i> , <i>Protium</i> y <i>Amyris</i>		
	Copales comerciales contemporáneos		

1.6 Espectroscopía de infrarrojo

Las técnicas espectroscópicas miden la absorción o la emisión de radiación electromagnética ocasionada por transiciones energéticas en la materia. Como su nombre lo indica, en la espectroscopía de infrarrojo se utiliza la sección lejana (FIR), media (MIR) o cercana (NIR) del infrarrojo (Figura 1.28) para analizar muestras sólidas, líquidas y gaseosas; por lo general, la región media (4000-400 cm⁻¹) es la más ocupada para examinar compuestos orgánicos. La espectroscopía de infrarrojo se emplea principalmente de forma cualitativa para el estudio estructural de

ANTECEDENTES

moléculas y para la identificación de compuestos o materiales (Mondragón, 2017; Rubinson y Rubinson, 2001).

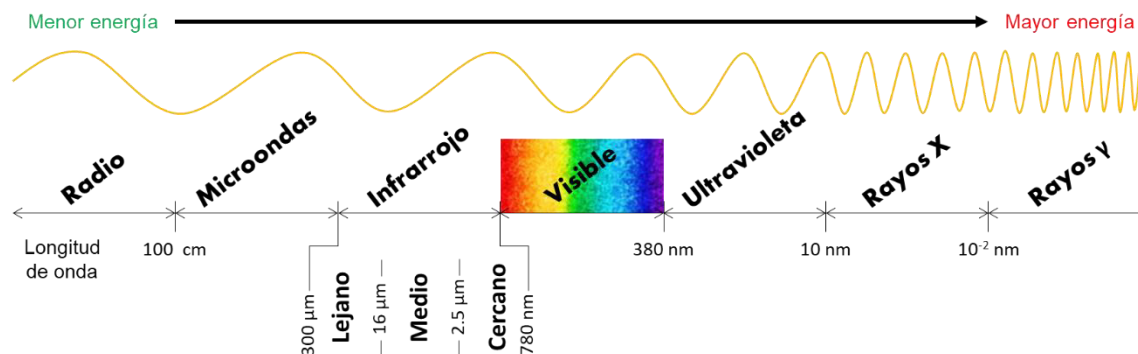


Fig. 1.28. *Espectro electromagnético.* Ilustración hecha por el autor.

En el campo del patrimonio cultural, la espectroscopía de infrarrojo se ha aplicado satisfactoriamente para detectar residuos orgánicos antes de recurrir a técnicas de mayor duración y/o más costosas, porque, además de ser microdestructiva o no destructiva, permite conocer la composición general de una muestra de una manera rápida sin la necesidad de una preparación laboriosa (Lettieri, 2015; Monnier, 2018). También se ha demostrado su utilidad en la caracterización de minerales (silicatos, carbonatos, cuarzos, etcétera) (Berna *et al.*, 2007; Venkatachalapathy *et al.*, 2002) y pigmentos inorgánicos como la azurita ($2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$) (Ferrera y Vergara, 2012).

1.6.1 Fundamento

El comportamiento de la radiación electromagnética se explica desde dos enfoques distintos: tratándola como una onda o como una partícula (dualidad onda-partícula). Según la teoría ondulatoria, esta radiación está constituida por ondas con una componente eléctrica y una magnética perpendiculares entre sí (Figura 1.29), por lo cual se le caracteriza con base en su longitud de onda (λ), su

ANTECEDENTES

número de onda ($\tilde{\nu}$) o su frecuencia (ν) (Ecuaciones 1, 2 y 3). De acuerdo con la teoría corpuscular, la radiación electromagnética está formada por partículas sin masa denominadas fotones ($h\nu$) que transportan una cantidad de energía (E) determinada por la frecuencia de la onda asociada (Ecuación 4) (Hernández y González, 2002; Thompson, 2018a).

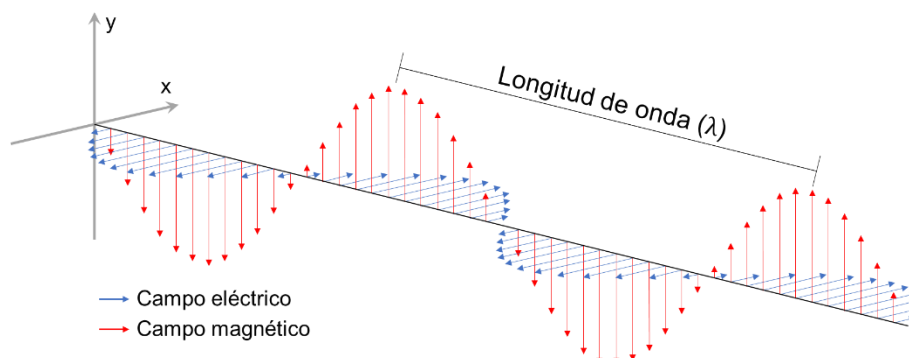


Fig. 1.29. Esquema de una onda electromagnética. Ilustración hecha por el autor.

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1)$$

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} \quad (2)$$

$$\tilde{\nu} = \frac{\nu}{c} \quad (3)$$

$$E = h\nu \quad (4)$$

Cuando la materia entra en contacto con radiación electromagnética puede reaccionar ante ella, absorbiéndola, transmitiéndola o reflejándola. Si se da una interacción entre la componente eléctrica o magnética de la radiación con alguna carga eléctrica de la especie química irradiada (X), esta absorberá una parte ($h\nu$) de la primera para pasar a un estado de mayor energía o excitado (X^*) (Ecuación 5), siempre y cuando, los fotones absorbidos ($h\nu$) contengan específicamente la

ANTECEDENTES

energía (ΔE) necesaria para dicha transición (Ecuación 6) (Hernández y González, 2002).



$$\Delta E = E_{X^*} - E_X = h\nu \quad (6)$$

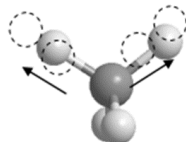
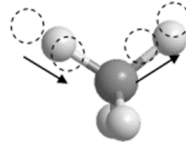
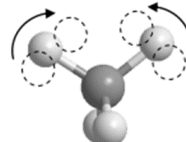
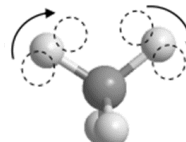
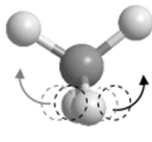
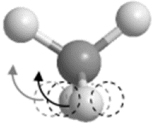
La radiación electromagnética absorbida por una molécula provoca excitaciones en tres grados distintos, en orden de menor a mayor carga energética: rotacional, vibracional y electrónico. El primero está relacionado con el movimiento en torno a ejes, el segundo con la vibración de los átomos y el último con la excitación de los electrones. Todo nivel electrónico tiene subniveles vibracionales y estos, a su vez, rotacionales. La radiación del infrarrojo aporta energía capaz de provocar transiciones rotacionales y vibracionales en compuestos que tienen enlaces con momento dipolar, o si este se les puede inducir como resultado de su vibración. (Mondragón, 2017; Skoog *et al.*, 2015).

Cuando la vibración de los átomos involucrados en un enlace químico modifica el momento dipolar, se genera un campo eléctrico que oscila con cierta frecuencia dependiendo de la masa de los átomos y la fuerza del enlace; sin embargo, también influyen considerablemente los enlaces vecinos y la estructura molecular. Si alguna onda electromagnética entra en resonancia con este campo eléctrico, el enlace absorberá el fotón para pasar a un estado vibracional excitado, es decir, se moverá con mayor amplitud, pero conservando la frecuencia (Mondragón, 2017; Rubinson y Rubinson, 2001).

El desplazamiento periódico de los átomos provoca cambios tanto en la longitud de los enlaces (estiramiento), como en la magnitud de los ángulos entre ellos (flexión/deformación). En moléculas con más de dos átomos existen muchas oscilaciones simultáneas en distintas direcciones, provocando movimientos complejos considerados como una combinación de otros más simples, conocidos como modos normales de vibración (Tabla 1.2) (Rubinson y Rubinson, 2001).

ANTECEDENTES

Tabla 1.2. *Modos normales de vibración.* (Thompson, 2018a).

Tipo de vibración molecular	Nombre del modo	Símbolo	Imagen ^b	
Estiramiento	Estiramiento simétrico	ν_s		
	Estiramiento asimétrico	ν_a, ν_{as}		
Flexión	En el plano	Tijereteo	δ^a	
		Balanceo	ρ	
	Fuera del plano	Torsión	τ	
		Aleteo	π, ω	

^a Esta letra (δ) también se ocupa, y es lo más común, para denotar flexiones en general.

^b Tomadas de Pacheco (2014).

1.6.2 Espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier

En la espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) el interferómetro de Michelson permite realizar las mediciones exponiendo la muestra

ANTECEDENTES

a la totalidad del intervalo de radiación deseado (Christian, 2009). Las ventajas de utilizar un espectrómetro por transformada de Fourier son: alta sensibilidad, tiempos de análisis cortos y el aumento de la relación señal/ruido debido a la posibilidad de promediar varios escaneos. Sin embargo, es necesario tener un espectro de referencia realizando una corrida sin muestra para después compararlo con aquel donde sí la hubo, y obtener el espectro real de absorción (Levine, 2009).

1.6.2.1 Instrumentación

En la Figura 1.30 se muestra el esquema de un espectrómetro de infrarrojo por transformada de Fourier, a continuación, se describe cada una de sus partes (Christian, 2009; Levine, 2009):

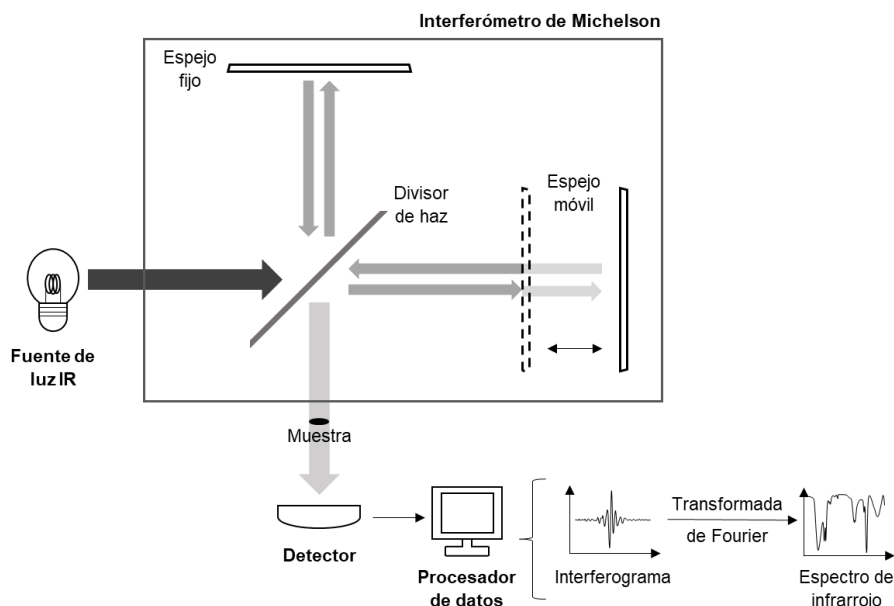


Fig. 1.30. Diagrama de un espectrómetro de infrarrojo con transformada de Fourier.

Ilustración hecha por el autor.

1. Fuente. Emite la radiación electromagnética.

ANTECEDENTES

2. Interferómetro de Michelson. Consta de un cristal divisor del haz de radiación, un espejo móvil que se aleja y se acerca a este con una rapidez constante, y uno fijo. El divisor manda una parte de la luz proveniente de la fuente al espejo móvil y otra al fijo. Estos la reflejan de nuevo al cristal y de ahí va a la muestra, pero como el haz del espejo móvil no recorre siempre la misma distancia, cuando se encuentra con el otro crea interferencia, por lo cual la distribución de frecuencias de onda se modifica continuamente.

3. Detector. Produce una señal eléctrica como resultado de la radiación recibida.

4. Procesador de datos. Toma la respuesta del detector en el dominio del tiempo (graficada se llama interferograma), le aplica la transformada de Fourier para pasarla al dominio de la frecuencia y resta las absorciones del espectro de referencia.

Para FTIR hay disponibles técnicas de interacción por transmisión, basadas en el paso del haz a través de la muestra, y por reflexión, fundamentadas en el fenómeno óptico homónimo. Por su practicidad, la reflectancia total atenuada (ATR) ha sido comúnmente preferida frente a otras. Funciona de la siguiente manera: el haz de radiación del infrarrojo incide y se refleja internamente en un cristal, sobre el cual se comprime la muestra, de esta manera una fracción de la radiación (onda evanescente) entrará en contacto con ella antes de salir hacia el detector (Figura 1.31) (Larkin, 2018).

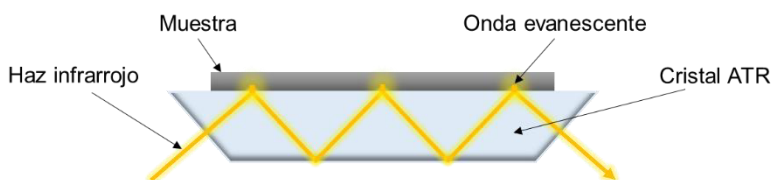


Fig. 1.31. Diagrama de un módulo ATR. Ilustración hecha por el autor.

1.6.3 Interpretación de los espectros de infrarrojo medio (MIR)

Un espectro de infrarrojo es una gráfica de la respuesta del detector en función de la longitud o número de onda, puede trazarse según la radiación absorbida (absorbancia) o transmitida (transmitancia) (Figura 1.32). En el espectro, los picos o bandas representan con su posición la longitud de onda absorbida y con su tamaño, la intensidad de la absorción. La zona de $4000\text{-}1400\text{ cm}^{-1}$ brinda información provechosa para inferir grupos funcionales; por otro lado, la de $1400\text{-}600\text{ cm}^{-1}$ muestra patrones de absorción propios de cada compuesto, por lo cual es llamada región de huellas dactilares (Mondragón, 2017).

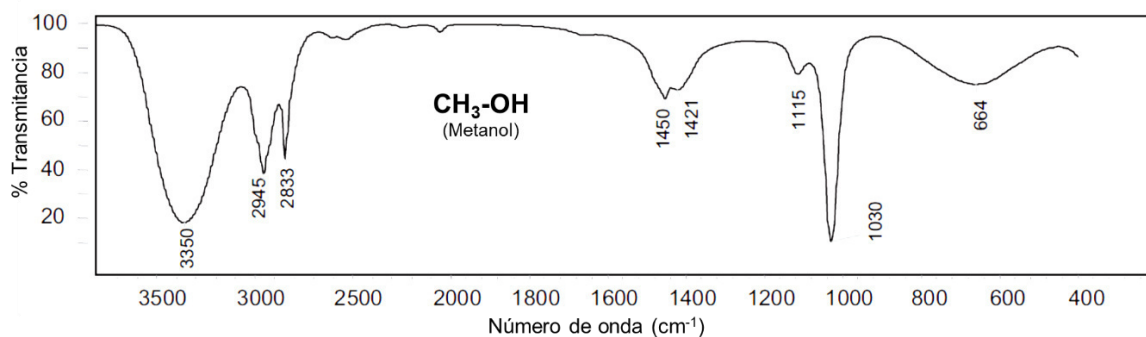


Fig. 1.32. Espectro de infrarrojo del metanol. Adaptado de Larkin (2018).

El espectro de infrarrojo de cierta muestra proporciona información estructural de las especies químicas que la conforman, cuyas absorciones corresponden a algún modo normal de vibración de cierto enlace. Por ejemplo, la absorción en la zona de $1740\text{-}1720\text{ cm}^{-1}$ corresponde al estiramiento de un doble enlace carbono-oxígeno en una cadena alifática (Pretsch *et al.*, 2020), es decir, con la posición de una banda es posible deducir el tipo de enlace, los átomos involucrados y hasta el arreglo molecular en general.

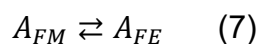
Estos gráficos también sirven para identificar sustancias desconocidas a través de la comparación de espectros, aquel de la muestra problema y otros de referencia obtenidos a partir del análisis de estándares. Aunque este método es

especialmente eficiente para compuestos puros, también es aplicable para mezclas, lo cual es de gran interés en el campo del patrimonio cultural (Ferrera y Vergara, 2012; Madariaga, 2015; Prati *et al.*, 2011; Rubinson y Rubinson, 2001).

1.7 Cromatografía de gases

Las técnicas cromatográficas son métodos físicos de separación de mezclas en las cuales los analitos se distribuyen en dos fases: una inmóvil (fase estacionaria) y otra que se desplaza en una dirección definida (fase móvil). En la cromatografía de gases, tanto la fase móvil como los analitos se encuentran en estado gaseoso, con la opción de usar fase estacionaria sólida (cromatografía de adsorción) o líquida (cromatografía de reparto) (Christian, 2009).

Al introducir una muestra en un cromatógrafo de gases, cada uno de sus componentes se reparte entre las dos fases (Ecuación 7) para establecer el equilibrio representado por la constante de distribución (K_A) (Ecuación 8). Sin embargo, la fracción de analito que permanece en la fase móvil es desplazada hacia adelante por acción de esta última, entonces vuelve a ocurrir un intercambio de materia entre las fases para compensar los cambios en las concentraciones. Este proceso se repite numerosas ocasiones a lo largo del recorrido por la fase estacionaria (Dettmer-Wilde y Engewald, 2014).



$$K_A = \frac{[A_{FE}]}{[A_{FM}]} \quad (8)$$

En cromatografía de gases, la función de la fase móvil únicamente es acarrear a los analitos a través del sistema cromatográfico. La separación de los compuestos se da a causa de las diferencias en sus afinidades por la fase estacionaria, pues el tiempo que una especie química es retenida lo determina la magnitud de dichas interacciones, expresadas en el valor de K_A ; en consecuencia, entre mayores son estas, más tarda un analito en eluir. A su vez, la constante de

ANTECEDENTES

distribución depende fuertemente de la presión de vapor, la cual es función de la temperatura. (Hernández y González, 2002).

Para poder analizar algún compuesto por cromatografía de gases, este debe tener una presión de vapor lo suficientemente alta como para ser vaporizado a la temperatura de trabajo, además ha de ser apropiado para el detector y poseer termoestabilidad (Polo, 2015). Cuando una molécula no es apta para este tipo de análisis porque su punto de ebullición es muy alto ($>400\text{ }^{\circ}\text{C}$) o no causa una respuesta en el detector, existe la posibilidad de recurrir a la derivatización, es decir, la modificación de su estructura química previa a la inyección para conferirle las características necesarias según sea el caso (Smith, 2003).

1.7.1 Instrumentación

Un cromatógrafo de gases consta de un sistema de suministro de fase móvil o gas acarreador, un puerto de inyección o inyector, una columna, un horno, un detector y un registrador de datos (Figura 1.33) (McNair y Miller, 2008).

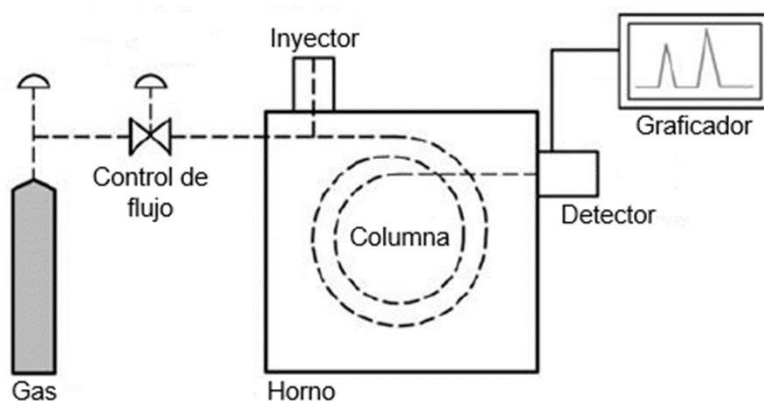


Fig. 1.33. Diagrama de un cromatógrafo de gases. Adaptado de Polo (2015).

El sistema de suministro de fase móvil está conformado por un tanque de un gas de alta pureza, químicamente inerte (usualmente helio, nitrógeno, argón,

ANTECEDENTES

hidrógeno o dióxido de carbono), reguladores de presión, medidores de flujo y filtros. Los analitos se introducen al sistema cromatográfico a través del inyector, donde son evaporados para posteriormente ser arrastrados por la fase móvil al interior de la columna. Los tres tipos de inyectores más comunes son *split/splitless*, *on-column* y el de inyección con temperatura programada (PTV) (Carro y Lorenzo, 2011; Polo, 2015).

El inyector *split/splitless* cuenta con una cámara de vaporización donde se mezcla la muestra con la fase móvil, además dispone de una salida de flujo alternativa a la de la columna, cuya apertura está regulada por una válvula (Figura 1.34). En su modalidad *split*, una fracción del volumen de gas en la cámara de vaporización se descarta abriendo la válvula mientras que el resto pasa a la columna, esto es muy útil cuando se trata con analitos en altas concentraciones. Por el contrario, una inyección en modo *splitless* sirve para análisis de compuestos a nivel de trazas porque la válvula se cierra completamente para no perder nada de muestra (Polo, 2015).

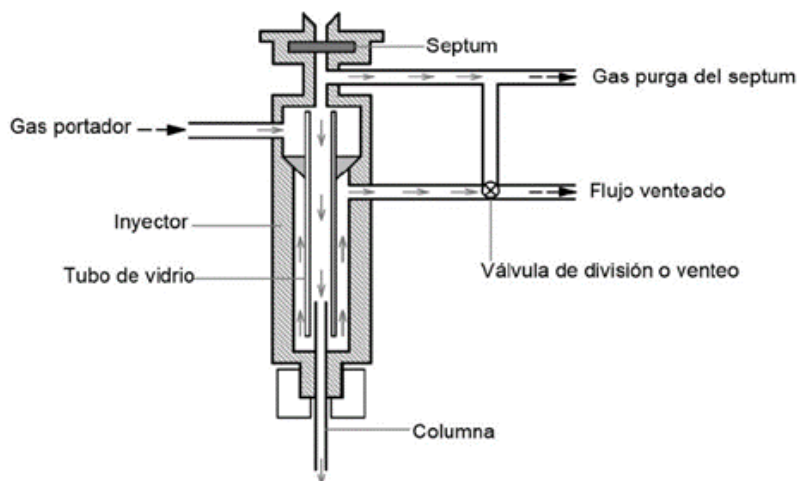


Fig. 1.34. Diagrama de un inyector *split/splitless*. Tomado de Polo (2015).

ANTECEDENTES

La columna es el componente más importante del sistema cromatográfico porque es ahí donde se lleva a cabo la separación; se trata de un tubo, generalmente fabricado de acero inoxidable o sílice fundida recubierta por poliamida, cuyo propósito es contener a la fase estacionaria (Figura 1.35). En las columnas capilares la fase estacionaria está depositada en las paredes internas dejando un vacío en el centro. Para mantener la temperatura de trabajo controlada, la columna se coloca dentro de un horno, el cual está equipado con una resistencia, un ventilador y un termopar (Polo, 2015).

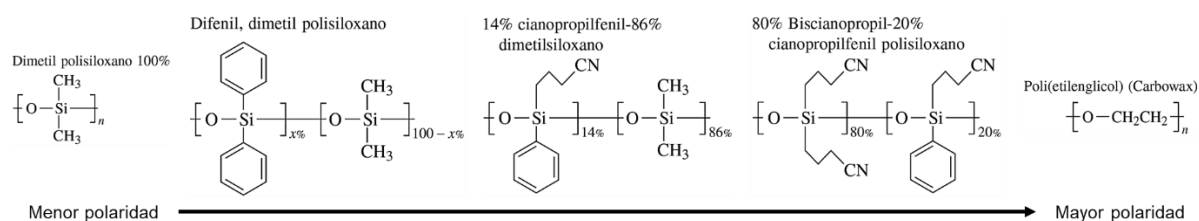


Fig. 1.35. Ejemplos de fases estacionarias líquidas para CG. Adaptado de Christian (2009).

Después de su paso por la columna, cada uno de los analitos va hacia el detector, donde, para no pasar desapercibidos, deberán ser capaces de provocar algún cambio en las propiedades fisicoquímicas de este (Tabla 1.3), así se genera una corriente eléctrica que se comunica al sistema de procesamiento de datos para su registro. Los resultados se muestran en una gráfica de la respuesta del detector contra el tiempo de análisis conocida como cromatograma, donde cada compuesto detectado se representa con un pico cuyo máximo corresponde con su tiempo de retención (t_R) y el área, con su abundancia (Figura 1.36) (Dettmer-Wilde y Engewald, 2014).

ANTECEDENTES

Tabla 1.3. Ejemplos de detectores para cromatografía de gases. (Dettmer-Wilde y Engewald, 2014).

Detector	Selectividad	Límite de detección (g.s ⁻¹)
Ionización de flama (FID)	Carbono	10 ⁻¹²
Conductividad térmica (TCD)	Universal	10 ⁻⁹
Nitrógeno-fósforo (NPD)	Nitrógeno o fósforo	10 ⁻¹²
Captura de electrones (ECD)	Grupos electronegativos	10 ⁻¹⁴
Masas selectivas (MSD)	Compuestos ionizables	10 ⁻¹³

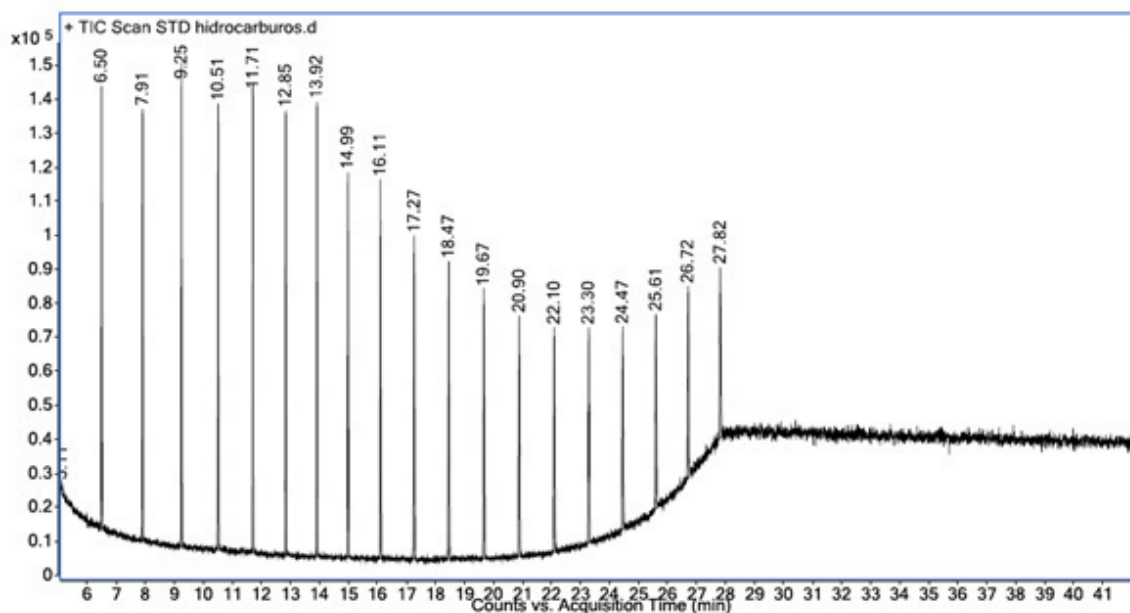


Fig. 1.36. Cromatograma de una serie de alcanos lineales. Tomado de Iturbe (2022).

1.8 Espectrometría de masas

La espectrometría de masas se basa en la generación, separación y detección de iones en fase gaseosa para contabilizarlos según su relación masa-carga (m/z). Cada una de estas tres tareas puede ejecutarse de diferentes formas, lo cual da lugar a una gran posibilidad de combinaciones con características particulares que las hacen adecuadas para cierto tipo de analito (Rubinson y

Rubinson, 2001). La información obtenida se usa principalmente para la identificación de sustancias desconocidas, la caracterización de estructuras moleculares, así como la cuantificación de analitos; por eso se le considera una técnica de especial utilidad para el estudio del patrimonio cultural (Colombini y Modugno, 2009).

1.8.1 Instrumentación

Un espectrómetro de masas consta de tres partes fundamentales: la fuente de iones, el analizador de masas y el detector, además es necesario un sistema de bombeo para disminuir la presión de todo el sistema o parte de él, así como un procesador de datos para el registro y tratamiento de estos (Figura 1.37) (Gross, 2017).

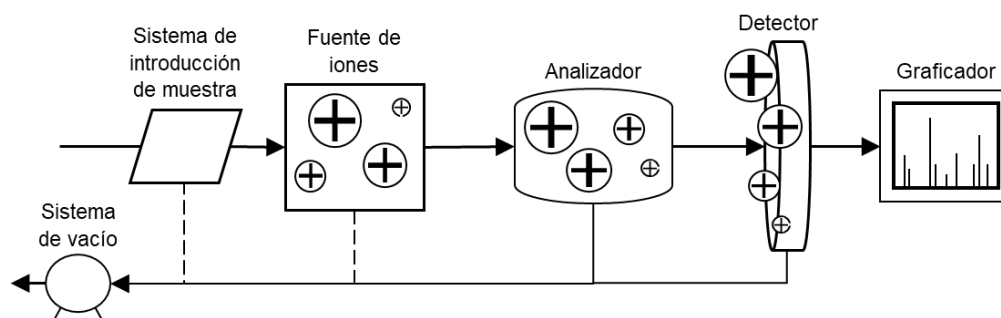


Fig. 1.37. *Diagrama de un espectrómetro de masas.* Ilustración hecha por el autor.

La muestra se introduce al espectrómetro de masas en la fuente de iones directamente o a través de una técnica de separación previa. La labor principal de este espacio es ionizar a las moléculas contenidas en él, aunque también sirve para evaporarlas cuando están en estado sólido o líquido y dirigir las hacia la siguiente sección del equipo (Rubinson y Rubinson, 2001).

ANTECEDENTES

Las especies químicas resultantes de la ionización del analito llegan al analizador de masas, en el cual se aprovecha algún fenómeno físico para separarlos en función de la masa y la carga eléctrica de cada una. Por último, los iones son enviados al detector, donde hay una superficie sensible a las partículas cargadas positivamente que responde al impacto de estas emitiendo fotones o electrones con una intensidad correspondiente a su abundancia, esa señal se traduce y registra (Sparkman *et al.*, 2011).

Para el acoplamiento de cromatografía de gases a espectrometría de masas, la columna cromatográfica se conecta al espectrómetro haciéndola pasar a través de un tubo que une ambos instrumentos, conocido como línea de transferencia, cuya temperatura debe ser similar a la del horno. En un sistema como el descrito anteriormente, únicamente se puede usar la técnica de ionización electrónica o la de ionización química (Bouchonnet, 2013).

1.8.2 Ionización electrónica

La ionización electrónica se lleva a cabo exponiendo a los analitos a un haz de electrones que se aceleran gracias a la aplicación de una diferencia de potencial eléctrico, en principio puede ser de cualquier magnitud, pero por convención se usan 70 eV, de esta manera se llega a resultados reproducibles y se posibilita la creación de bibliotecas con espectros de masas de referencia. Ordinariamente, la energía suministrada por los electrones provoca no solamente la ionización de las moléculas por la pérdida de un electrón, también causa su ruptura en fragmentos ionizados (Figura 1.38) (Bouchonnet, 2013).

ANTECEDENTES

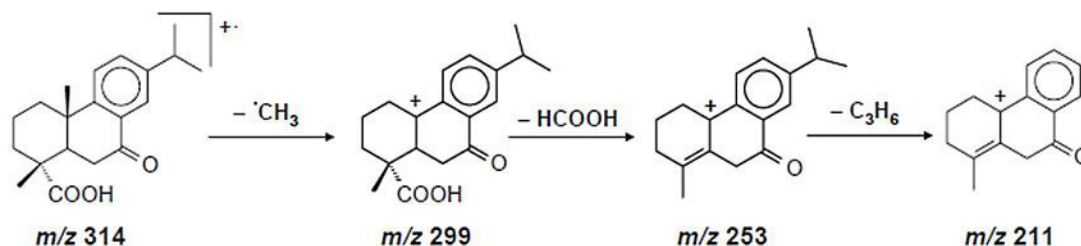


Fig. 1.38. Ruta de fragmentación del ácido 7-oxo-dehidroabiético. Tomado de Colombini y Modugno (2009).

La fuente de iones para ionización electrónica consiste en una cámara provista de un filamento incandescente para la emisión de electrones, un ánodo colocado en el extremo opuesto para atraerlos, unos imanes colocados apropiadamente para forzarlos a seguir una trayectoria helicoidal y placas para conducir a los iones resultantes al analizador de masas (Figura 1.39) (Sparkman *et al.*, 2011).

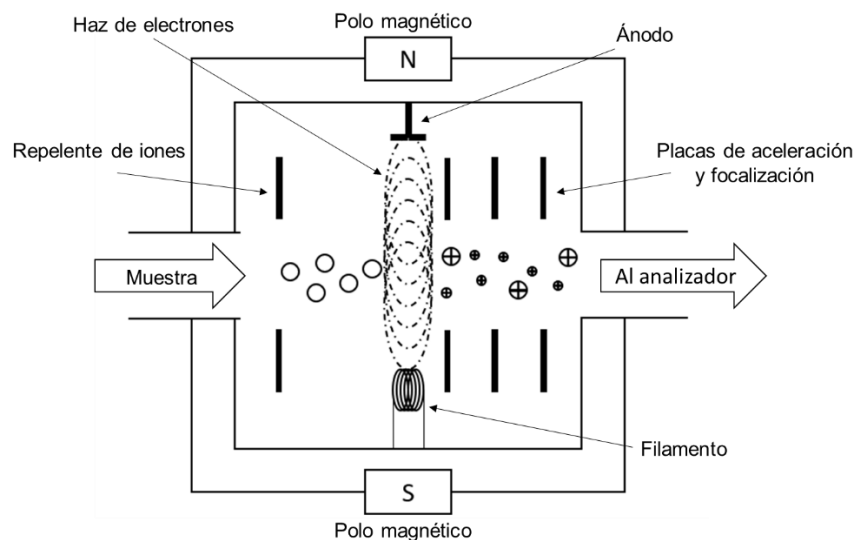


Fig. 1.39. Diagrama de una fuente de iones por ionización electrónica. Ilustración hecha por el autor.

1.8.3 El espectro de masas

Los resultados de un análisis por espectrometría de masas se pueden mostrar como un perfil de iones, una gráfica de barras e incluso tabulados (Figura 1.40). En cualquier caso, en las abscisas se indica la relación masa-carga (m/z) de los iones detectados y en las ordenadas, su abundancia; a estos diagramas se les denomina espectros de masas (Gross, 2017).

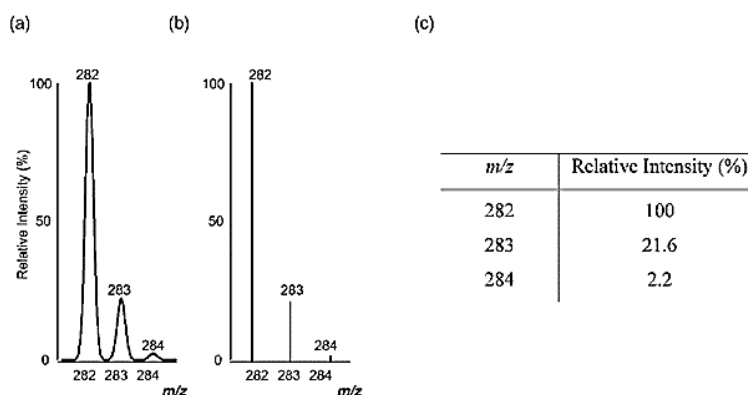


Fig. 1.40. Espectro de masas representado como (a) perfil de iones, (b) gráfica de barras y (c) tabla. Tomado de Colombini y Modugno (2009).

En un espectro de masas se encuentran hasta tres tipos de picos: el pico del ion molecular (no siempre aparece), es debido a moléculas que sí fueron ionizadas, pero no sufrieron fragmentación; el pico base (el de mayor altura), pertenece al ion más cuantioso, por lo tanto, los otros picos se normalizan respecto a él para calcular las abundancias relativas; y los picos de los iones fragmentos, cuyo perfil depende tanto de la naturaleza química del analito, como de la técnica de ionización utilizada (Figura 1.41) (Thompson, 2018b).

ANTECEDENTES

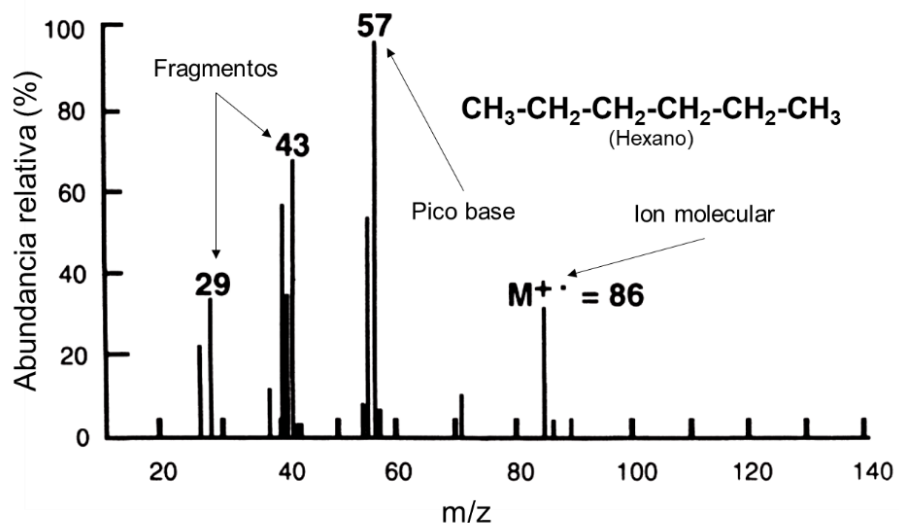


Fig. 1. 41. *Espectro de masas del hexano.* Adaptado de McNair y Miller (2008).

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Materiales y equipos

2.1.1 Disolventes y reactivos

- Diclorometano grado cromatográfico (Fermont, 99%)
- Hexano grado cromatográfico (Fermont, 99%)
- Isopropanol grado cromatográfico (J. T. Baker, 99%)
- Helio 5.0 (Praxair, 99.999%)
- Nitrógeno 4.8 (Praxair, 99.998%)

2.1.2 Materiales de laboratorio

- Tubos de ensayo de vidrio de 10 mL con tapa de rosca
- Espátula
- Mortero ágata
- Pipetas Pasteur
- Soporte universal
- Pinza de tres dedos
- Viales cromatográficos transparentes de 2 mL

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

- Insertos de vidrio de 250 μL

2.1.3 Instrumentos

- Balanza analítica A&D Weighing, PHOENIX GH-202
- Micropipeta de 10-100 μL Ohaus, Across TM Pro A0-100
- Micropipeta de 100-1000 μL Ohaus, Across TM Pro A0-1000
- Baño de ultrasonido Elma, Elmasonic Easy 100H
- Centrifugadora Benchmark Scientific, Hermle Z306
- Agitador Scientific Industries, Vortex-Genie 2 SI-0236

2.1.4 Equipos

- Espectrómetro de infrarrojo Agilent Technologies Cary 670. Módulo para ATR PIKE Technologies GladiATR (Figura 2.1).

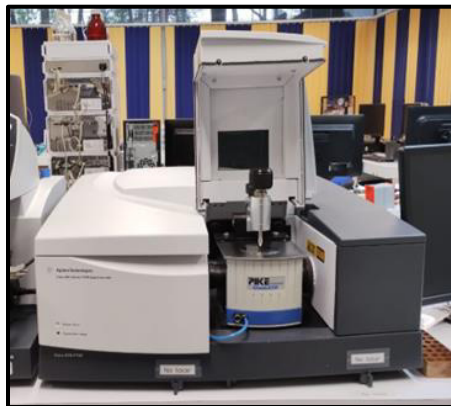


Fig. 2.1. Espectrómetro de infrarrojo del LANCIC-IQ. Archivo personal del autor.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

- Cromatógrafo de gases Agilent Technologies 7890B acoplado a un espectrómetro de masas Agilent Technologies 5977A. Automuestreador de cromatógrafo de gases Agilent Technologies 7693 (Figura 2.2).



Fig. 2.2. *Cromatógrafo de gases acoplado al espectrómetro de masas del LANCIC-IQ.*
Archivo personal del autor.

2.2 Muestras de braseros y sahumador

Las muestras proporcionadas al LANCIC-IQ por la Maestra Rocío Velasco Fuentes consisten en aproximadamente 1 g de barro en polvo contenido en bolsas de plástico resellables debidamente identificadas (Figura 2.3), que ella misma raspó de los quemadores de copal con ayuda de una miniamoladora Dremel en las instalaciones del Museo de Antropología de Xalapa (MAX). Con el fin de evitar la contaminación de las muestras, durante la manipulación de los objetos se usaron guantes de nitrilo y cubrebocas, además el material utilizado para desgastar el barro se limpió entre cada muestreo (Velasco, 2018).



Fig. 2.3. Muestras de quemadores de copal. Archivo personal del autor.

De Nopiloa se recibieron 7 muestras tomadas de un sahumador y tres braseros (Tabla 2.1), para facilitar la presentación de la información, se renombraron según el tipo de quemador y la zona de muestreo («P» para paredes, «C» para chimenea, «G» para general, «F» para fondo y «AFE» para adherencias del fondo externo) (Figuras 2.4-2.7). Adicionalmente, en la Tabla 2.1, se indica entre paréntesis el número de registro ante el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) de las piezas de donde se obtuvo el material.

Tabla 2.1. Muestras de quemadores de copal.

Quemador de copal	Muestra	Zona de muestreo
Brasero1 (5045)	Brasero1P	Paredes internas
	Brasero1C	Interior de la chimenea
Brasero2 (4218)	Brasero2G	Interior en general

Tabla 2.1. Muestras de quemadores de copal. (continuación)

Quemador de copal	Muestra	Zona de muestreo
Sahumador1 (4222)	Sahumador1P	Paredes internas
	Sahumador1F	Fondo interno
Brasero3 (4538)	Brasero3F	Fondo interno
	Brasero3AFE	Adherencias externas en la base

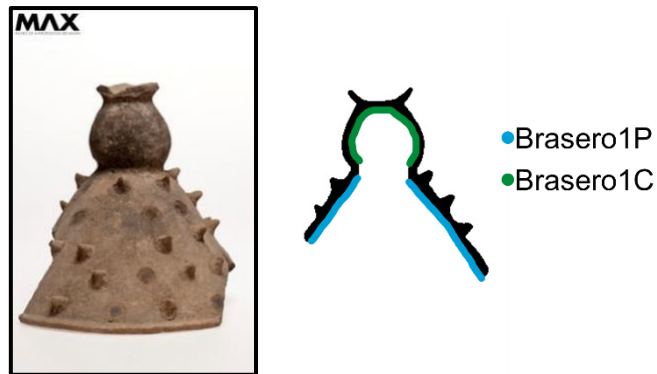


Fig. 2.4. Brasero1, zonas de muestreo. Fotografía tomada del catálogo digital MAX, diagrama elaborado por el autor.



Fig. 2.5. Brasero2, zona de muestreo. Fotografía tomada del catálogo digital MAX, diagrama elaborado por el autor.

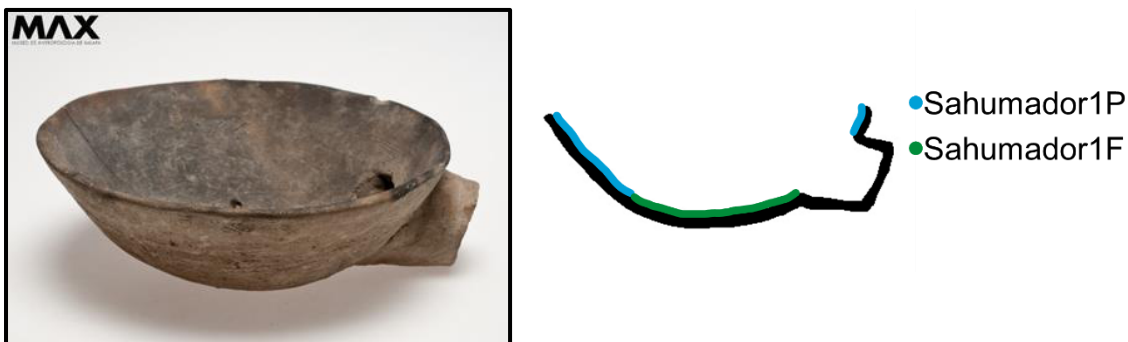


Fig. 2.6. *Sahumador1*, zonas de muestreo. Fotografía tomada del catálogo digital MAX, diagrama elaborado por el autor.

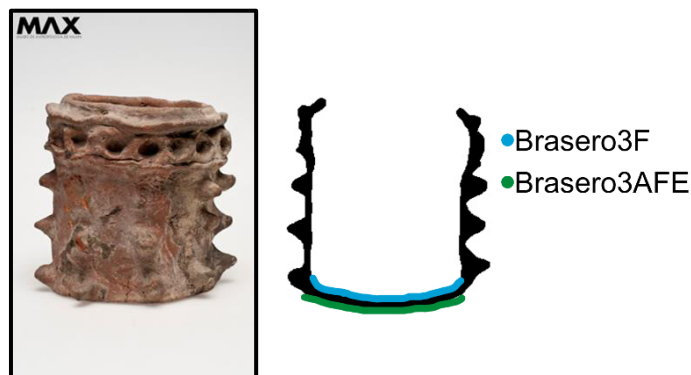


Fig. 2.7. *Brasero3*, zonas de muestreo. Fotografía tomada del catálogo digital MAX, diagrama elaborado por el autor.

2.3 Preparación de los extractos de las muestras de quemadores de copal

Una fracción de cada muestra se destinó a la preparación de extractos, principalmente para inyectarlos en el cromatógrafo de gases acoplado al espectrómetro de masas, aunque también fueron analizados con espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier. Dicho tratamiento previo consistió en lo siguiente: se pesaron entre 30-50 mg de polvo, se introdujeron en un tubo de ensayo

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

con tapa, después se llevaron a cabo 2 o 3 extracciones según el procedimiento de la Figura 2.8 y finalmente se reconstituyó el extracto en hexano; la Tabla 2.2 indica las particularidades de la extracción de cada muestra.

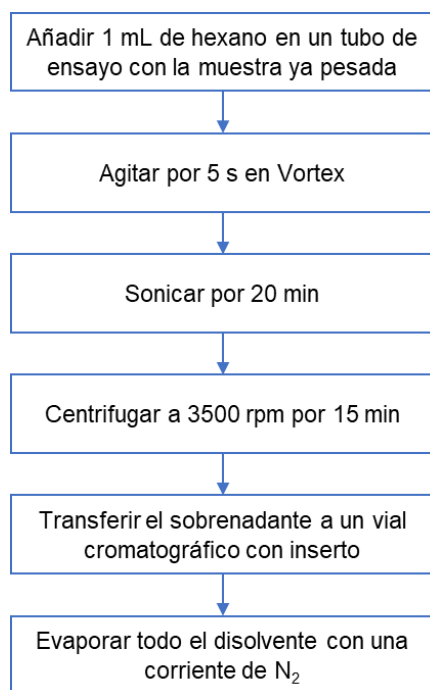


Fig. 2.8. *Diagrama de flujo del método de extracción.*

En la preparación de muestras se recurre a la extracción asistida por ultrasonido como una forma de intensificar la transferencia de masa desde una matriz sólida hacia un disolvente. Dicha operación se logra exponiendo la mezcla de estos últimos a ondas acústicas con frecuencias superiores a 20 kHz, las cuales dan lugar al fenómeno de cavitación acústica; provocando agitación en el medio y el aumento del área de interfase (Figura 2.9). Además de ser tanto económica como fácil de usar, con esta técnica se consigue reducir el consumo de disolvente, el gasto energético y la generación de residuos tóxicos durante el proceso de extracción (Tiwari, 2015).

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

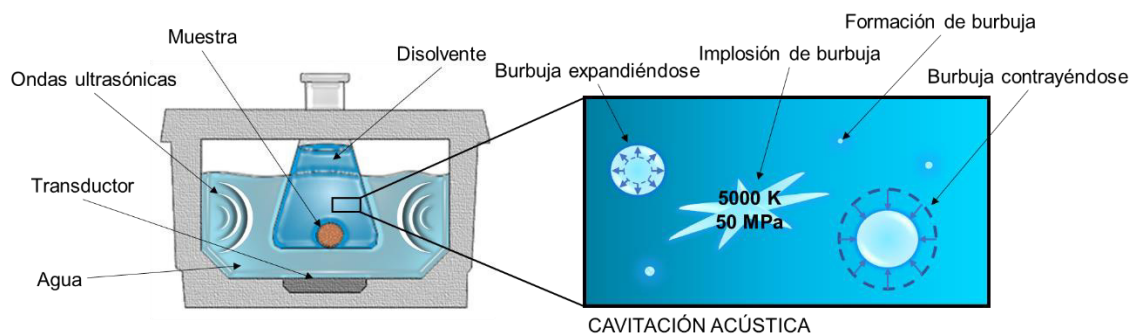


Fig. 2.9. Diagrama de un baño de ultrasonido y el fenómeno de cavitación acústica.

Ilustración hecha por el autor.

Tabla 2.2. Extractos de los polvos de quemadores de copal.

Nombre del extracto	Muestra procesada	Masa de polvo (mg)	T _{sonicación} (°C)	No. de extracciones	V _{reconstitución} (μL)
EB1P	Brasero1P	50.1	35	2	50
EB1C	Brasero1C	50.1	35	2	50
EB2G	Brasero2G	51.8	35	2	100
ES1P	Sahumador1P	51.5	Ambiente	2	20
ES1F	Sahumador1F	30.7	Ambiente	3	20
EB3F	Brasero3F	50.4	Ambiente	2	20
EB3AFE	Brasero3AFE	53.6	35	2	50

2.4 Análisis con espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier

Los análisis se realizaron en la región de 4000-400 cm⁻¹ con 64 escaneos y una resolución de 4 cm⁻¹, limpiando el módulo de ATR con pañuelos de baja pelusa

marca Kimtech e isopropanol después de cada medición. Los espectros de infrarrojo se procesaron con los programas Agilent Resolutions Pro y Microsoft Excel. El equipo permite analizar los polvos y también los extractos; sin embargo, fue necesaria la preparación de muestra explicada a continuación:

- **Polvos:** Se tomaron aproximadamente 3 mg de la muestra para macerarla en un mortero ágata hasta reducir considerablemente el tamaño de sus partículas, enseguida, se cubrió el cristal del módulo de ATR con el polvo para realizar el análisis.
- **Extractos:** Después de su inyección en el cromatógrafo, los extractos se dejaron secar, se reconstituyeron en aproximadamente 10 μL de diclorometano, se agitaron por 5 segundos en el Vortex, se transfirieron al módulo de ATR y, después de la evaporación del disolvente, se efectuó el análisis.

2.5 Análisis con cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas

Antes de analizar un grupo de muestras se corrieron blancos de disolvente y de columna para verificar su pureza y limpieza, respectivamente. Se inyectó 1 μL de extracto (ver Tabla 2.2) en modo *splitless* a 300 °C y 8.9778 psi. Se usó una columna HP5-MS (J&W, 30 m x 250 μm x 0.25 μm). La fase móvil fue helio con un flujo de 1 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$. El programa de temperatura se muestra en la Figura 2.10. Los iones se generaron con ionización electrónica a 70 eV a una temperatura de 230 °C en la fuente y 150 °C en el cuadrupolo. La adquisición de datos se realizó en modo TIC después de un *solvent delay* de 5 min en el rango de 25-500 m/z, con MassHunter Acquisition Software. Los resultados se procesaron con los programas MassHunter Qualitative Analysis, Unknowns Analysis y Microsoft Excel.

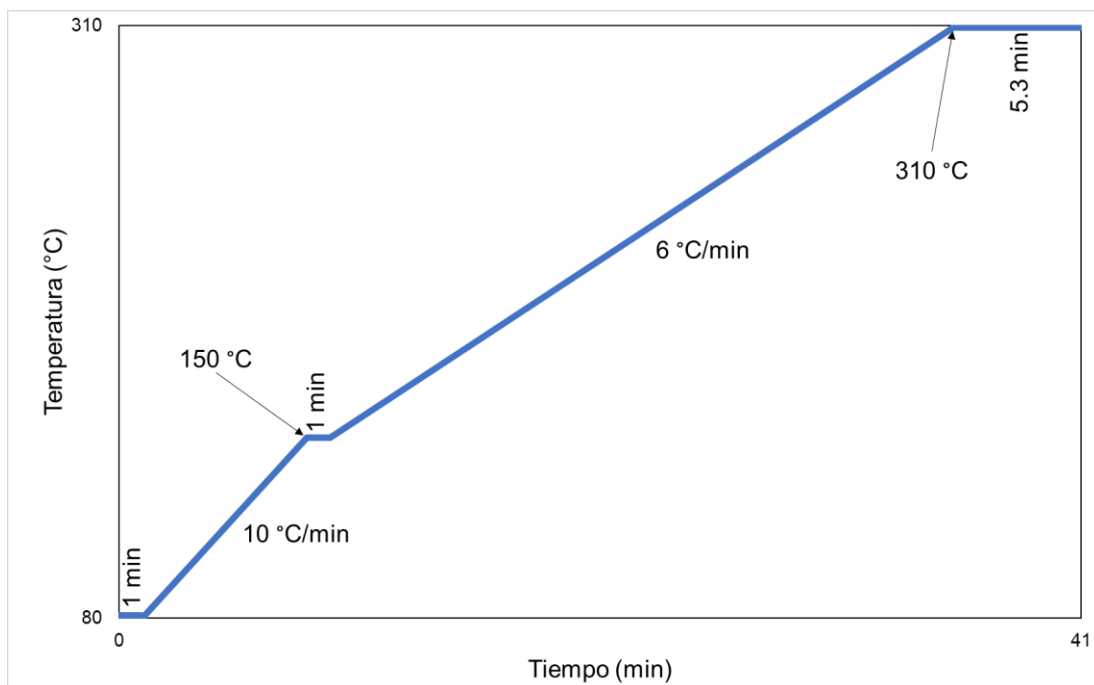


Fig. 2.10. *Rampa de temperatura del horno.*

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis con espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier

En caso de existir residuos orgánicos en los quemadores de donde se tomaron las muestras, debieron haberse conservado adsorbidos en el barro a nivel de trazas. En vista de ello, con el propósito de corroborar si hay compuestos orgánicos procedentes de copal en los polvos, se recurrió a la espectroscopía de infrarrojo; técnica que permite realizar mediciones a sólidos en cuestión de segundos.

Según Derrick *et al.* (1999), los espectros de infrarrojo de resinas, ceras, proteínas y aceites tienen una semejanza: muestran señales intensas en la región de estiramiento C-H; pero el de una resina vegetal se diferencia por presentar una banda debida al estiramiento de enlaces carbonílicos entre 1715 y 1695 cm^{-1} , también es común la aparición de absorciones de O-H alrededor de 3400 cm^{-1} , solo que estas no siempre son de compuestos orgánicos. Con base en esta información y la revisión de espectros de resinas certificadas de especies *Bursera* (Lucero, 2012; Ramírez *et al.*, 2021; Riquelme *et al.*, 2017) se elaboró la Tabla 3.1, donde se indican las absorciones más comunes en sus espectros de infrarrojo.

Tabla 3.1. Señales más comunes en los espectros de infrarrojo de copales de *Bursera*.

Región IR (cm^{-1})	Asignación	No. de bandas
~3400	v OH	Uno
3000-2800	v C-H	Hasta cuatro
1720-1695	v C=O	Uno
1650-1635	v C=C	Uno
1475-1365	δ C-H	Hasta dos

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ahora bien, en caso de no obtener espectros similares a los de copal de *Bursera* a consecuencia de su combustión y mezcla con otros materiales, para intentar conseguir la identificación de estas resinas con espectroscopía de infrarrojo, aún se tiene la opción de comparar los espectros de sus biomarcadores con los de las muestras para buscar similitudes. Por ejemplo, la mezcla de α - y β -amirina da origen a bandas características en 3272, 2976, 2946, 2928, 2838, 1465 y 1037 cm^{-1} (Oliveira *et al.*, 2022); por su lado, el lupeol, en 3325, 2958, 1645 y 1229 cm^{-1} (Hamid *et al.*, 2017).

3.1.1 Análisis de las muestras de quemadores de copal

En general, los espectros de los polvos (ver Anexo A) son muy parecidos entre sí, observándose en todos estos un patrón de absorción debido al barro con algunas diferencias en la intensidad y posición de las bandas (Figura 3.1), lo cual sugiere el empleo de técnicas y materiales similares para la fabricación de las piezas arqueológicas estudiadas. En la Tabla 3.2 se enumeran las principales señales detectadas en cada muestra.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

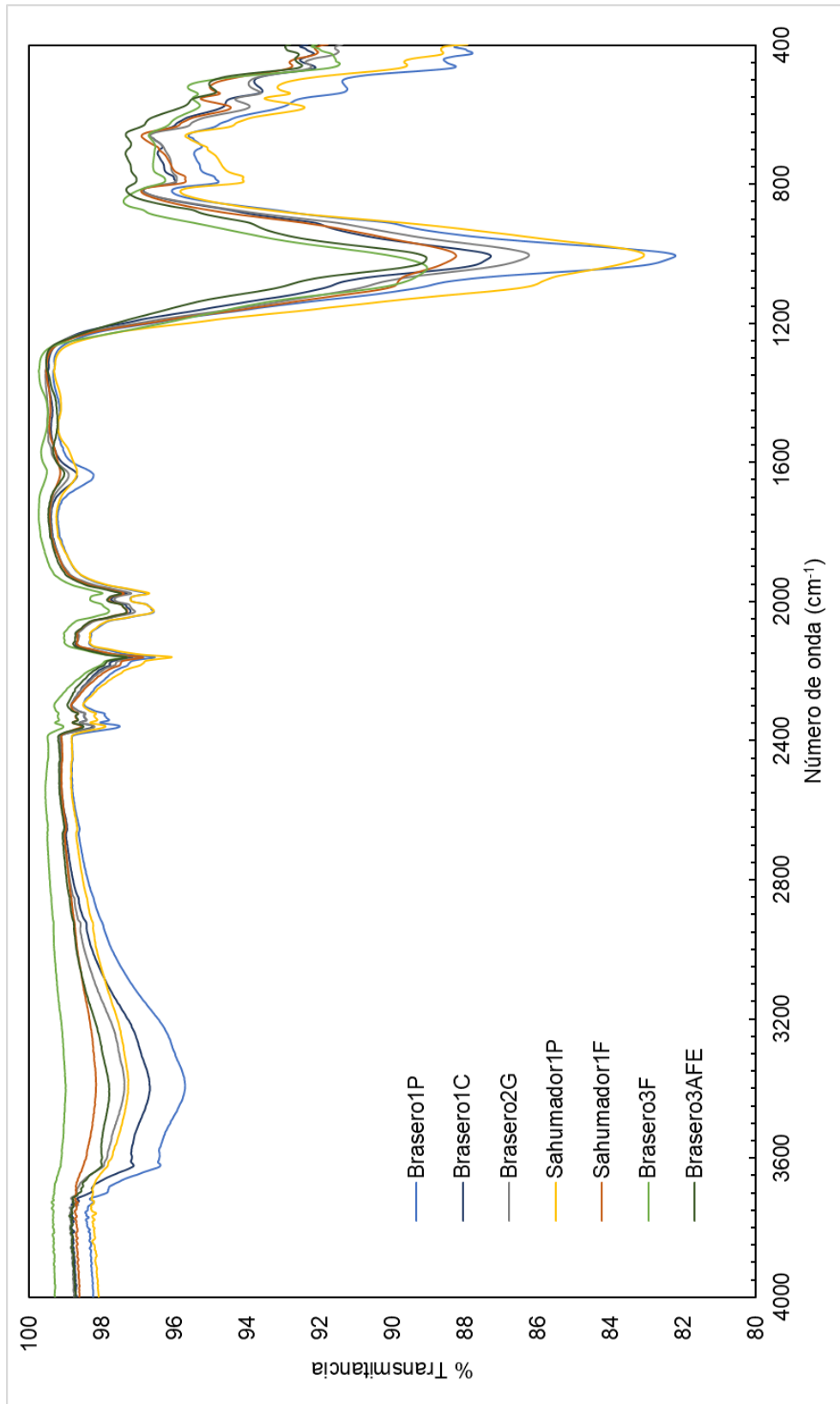


Fig. 3.1. Espectros de infrarrojo de los polvos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3.2. Señales más notables en los espectros de infrarrojo de los polvos.

Muestra	Bandas (cm ⁻¹)
Brasero1P	3621, 3397, 2655, 1637, 1456, 1006, 794, 693, 527, 463, 423
Brasero1C	3623, 3397, 2933, 2852, 2655, 1639, 1008, 793, 693, 533, 465, 426
Brasero2G	3623, 3384, 2929, 2857, 2653, 1637, 1004, 782 577, 538, 462, 419
Sahumador1P	3412, 2653, 1629, 1004, 792, 781, 580, 539, 459, 423
Sahumador1F	3446, 2648, 1629, 1007, 792, 777, 581, 540, 460, 421
Brasero3F	3406, 1628, 1467, 1042, 790, 693, 574, 542, 454
Brasero3AFE	3621, 3413, 2648, 1632, 1014, 788, 685, 535, 460, 428

3.1.1.1 Señales debidas a compuestos inorgánicos

La espectroscopía de infrarrojo manifiesta que en las muestras de quemadores de copal predominan los compuestos inorgánicos, siendo la gran mayoría de las absorciones originadas por ellos. En seis espectros, la absorción más intensa está entre 1014 y 1004 cm⁻¹, en el restante (Brasero3F), en 1042 cm⁻¹; todos ellos corresponden al estiramiento de enlaces Si-O de silicatos, solo que el de Brasero3F es específico de caolinita. En los siete espectros dicha banda exhibe una forma irregular, apreciándose hombros alrededor de 1090, 1030 y 910 cm⁻¹ (Figura 3.2), esto puede ser resultado del traslape de las señales causadas por el estiramiento de enlaces Si-O de cuarzo, de caolinita y la flexión de grupos OH de caolinitas, respectivamente (Madejová y Komadel, 2001; Shillito *et al.*, 2009). Los espectros de los polvos de Sahumador1 presentan una mejor resolución del hombro

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

debido al cuarzo porque la absorción fue relativamente más intensa, por lo tanto, hay una mayor presencia de este mineral en esta pieza en comparación con las otras tres.

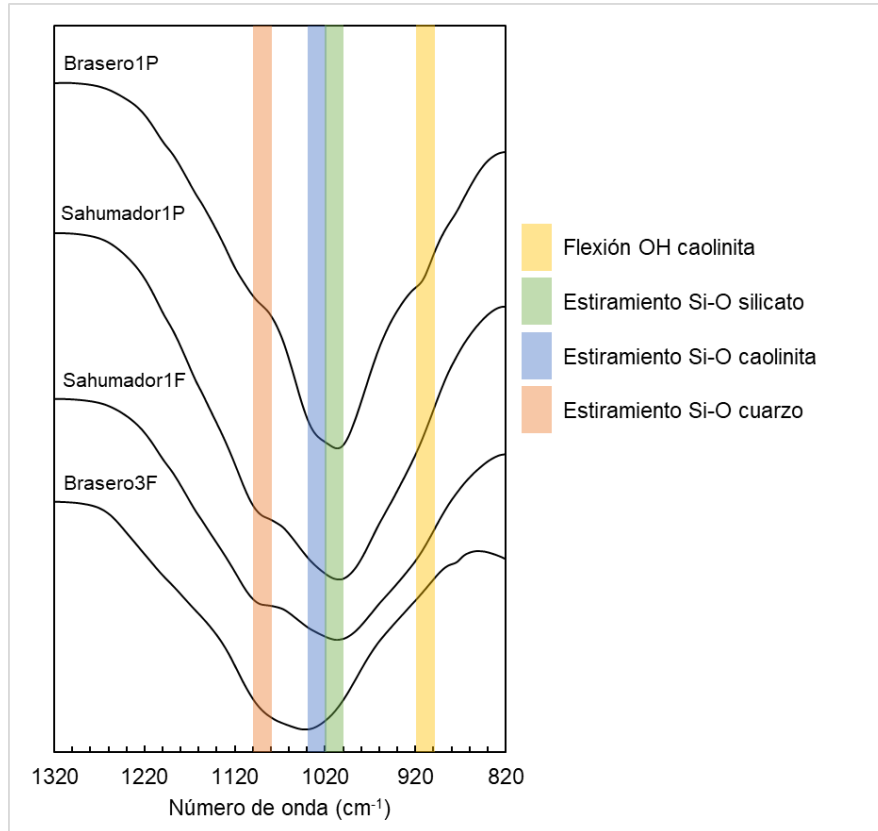


Fig. 3.2. Comparación de los espectros de infrarrojo de cuatro muestras de barro entre 1320 y 820 cm^{-1} .

El estiramiento Si-O en cuarzo también es responsable de las absorciones cercanas a 790 y 780 cm^{-1} ; de forma similar, los silicatos lo son de dos bandas entre 3694 y 3621 cm^{-1} propias de grupos OH estructurales, otra por 1630 cm^{-1} relacionada con la deformación H-O-H y una en la proximidad de 460 cm^{-1} por la flexión de enlaces Si-O-Si (Lettieri y Giannotta, 2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los espectros también se refleja la presencia de agua absorbida, es decir, humedad en las muestras, mediante bandas en las cercanías de 3400 y 1630 cm^{-1} . La primera de ellas, extendida y achatada, se debe al estiramiento de enlaces H-O-H, mientras la segunda, más estrecha, surge de su flexión. Finalmente, hay otras señales atribuibles a especies inorgánicas, como el estiramiento PO-H alrededor de 2650 cm^{-1} y la flexión de óxidos de hierro en torno a 580 y 530 cm^{-1} (Madejová, 2003; Pretsch *et al.*, 2020; Seetha y Velraj, 2015).

Los espectros de infrarrojo de las muestras de Brasero2G, Sahumador1P, Sahumador1F y Brasero3F exhiben indicios de la exposición del barro a altas temperaturas, estos son: la disminución de la intensidad de las absorciones relacionadas con la humedad y la desaparición de las bandas de grupos OH estructurales a causa de la deshidroxilación de los silicatos, lo cual da lugar a una mayor uniformidad en la banda cercana a 1000 cm^{-1} (Venkatachalapathy *et al.*, 2002). Es necesario aclarar que con esta información no es posible asegurar si estos rasgos se deben al calentamiento durante su proceso de manufactura o a su uso como quemadores de copal, además tampoco puede descartarse que Brasero1 también haya sufrido estos cambios, pero después se haya rehidratado; en consecuencia, para poder confirmar alguna de las hipótesis anteriores se necesitan estudios más minuciosos.

Exclusivamente en el caso de Brasero3 es viable presentar los resultados de la espectroscopía de infrarrojo como evidencia de su uso para contener fuego, pues el espectro de Brasero3F, cuyo barro fue tomado del interior de la pieza, donde supuestamente se depositaban las ofrendas, sí presenta las características descritas en el párrafo precedente, a diferencia de Brasero3AFE, cuyo polvo se raspó de la parte exterior de la base (Figura 3.3). Si la deshidratación del barro del brasero fuese producto de su cocimiento al momento de haber sido fabricada, los espectros de sus muestras presentarían absorciones de enlaces O-H similares sin importar la zona de extracción, sin embargo, esto no es así.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

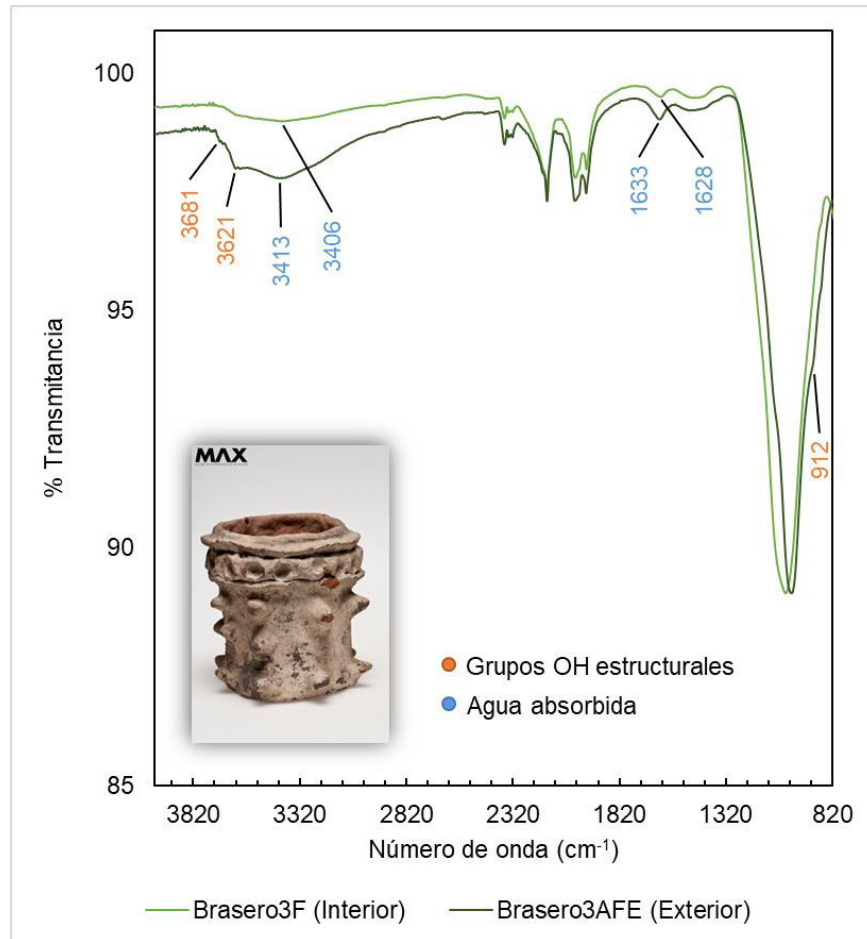


Fig. 3.3. *Diferencias espectrales de los polvos de Brasero3.* Fotografía tomada del catálogo digital MAX.

3.1.1.2 Evaluación de la presencia de residuos orgánicos

Por tratarse de análisis de mezclas donde abundan más las especies inorgánicas, probablemente las señales de orgánicos no sean lo suficientemente intensas como para detectarlas, de esta forma, la identificación podría no ser tan específica como se pretende, quedando solamente a nivel de resina vegetal o residuo orgánico. Dicho esto, para determinar la presencia de compuestos orgánicos en los polvos de quemadores de copal mediante espectroscopía de infrarrojo de una forma clara y rápida, lo más factible es buscar a las bandas

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

causadas por la absorción de enlaces C-H de grupos CH₂ y CH₃ de alcanos (Tabla 3.3). Son de especial utilidad las señales de los estiramientos C-H porque son más intensas que las de los otros modos de vibración, además aparecen en una zona donde difícilmente son ocultadas por otras bandas (Derrick *et al.*, 1999).

Tabla 3.3. Absorciones de grupos CH₂ y CH₃ de alcanos. (Pretsch *et al.*, 2020).

Región del IR (cm ⁻¹)	Asignación	Intensidad
3000-2840	v CH	Fuerte
1475-1430	δ CH ₂ y δ _{as} CH ₃	Media
1395-1365	δ _s CH ₃	Media
770-720	γ CH ₂	Débil

A simple vista, en los espectros de los polvos no se aprecian bandas entre 3000 y 2840 cm⁻¹, solamente en los espectros de Braser01C y Braser02G se distinguen unas pequeñas bandas. Esto se debe a la absorción intensa de los grupos OH, que por ser mayor a la de los enlaces C-H, interfiere con estos últimos, entonces para poder examinar la región mencionada de manera más precisa, fue necesario hacer un acercamiento (Figura 3.4).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

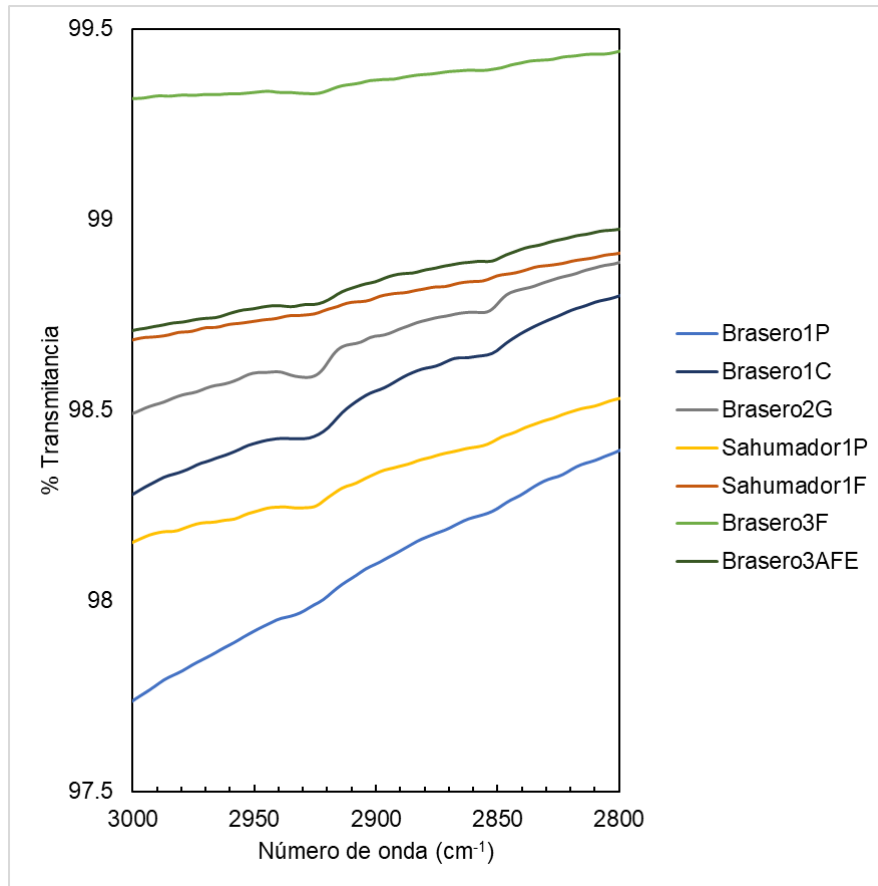


Fig. 3.4. Comparación de los espectros de infrarrojo de los polvos en la región de absorción por estiramiento de enlaces C-H.

Con la ampliación mostrada en la Figura 3.4 se hace más notoria la presencia de bandas, algunas apenas perceptibles, cercanas a 2926 y 2855 cm^{-1} (Tabla 3.4), indicadoras del estiramiento asimétrico, la primera, y simétrico, la segunda, de grupos metileno. Las señales de grupos metilo deberían estar a unas cuantas decenas de cm^{-1} por arriba de sus homólogos de CH_2 (Smith, 1998), si bien no se encontraron, seguramente fueron completamente encubiertas por la absorción del enlace O-H.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3.4. Señales en los espectros de infrarrojo de los polvos entre 3000 y 2800 cm^{-1} .

Muestra	Bandas (cm^{-1})
Brasero1P	2924, 2852
Brasero1C	2933, 2852
Brasero2G	2929, 2857
Sahumador1P	2932, 2858
Sahumador1F	-
Brasero3F	2926, 2857
Brasero3AFE	2930, 2855

En teoría, la presencia de metilenos debería confirmarse ubicando a las absorciones por debajo de 1500 cm^{-1} listadas en la Tabla 3.3; sin embargo, en ningún espectro se pudo identificar alguna de ellas porque fueron ocultadas por las señales de especies inorgánicas. Aunque tampoco se observan otras bandas típicas de copales de *Burseras*, ni de los biomarcadores enumerados en la sección 3.1, las absorciones de metilenos (Tabla 3.4) permiten confirmar la existencia de compuestos orgánicos en seis de los siete polvos de quemadores de copal.

Finalmente, no se puede descartar la presencia de restos de copal en las piezas porque las absorciones de metilenos son propias de resinas vegetales (Derrick *et al.*, 1999). Por consiguiente, es necesario analizar Brasero1P, Brasero1C, Brasero2G, Sahumador1P, Brasero3F y Brasero3AFE mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas, e incluso

Sahumador1F, como una forma de comprobar si efectivamente no hay residuos orgánicos.

3.1.2 Análisis de los extractos

En vista de la interferencia ocasionada por el barro en los espectros de los polvos de los quemadores de copal, se decidió analizar también con espectroscopía de infrarrojo los extractos preparados para cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas. Sin embargo, se hizo después de su inyección al cromatógrafo para no disminuir la cantidad de analitos extraídos, de lo contrario, se dificultaría la identificación de compuestos con el sistema acoplado.

Para transferir los extractos de los insertos cromatográficos al módulo de ATR del espectrómetro, se optó por reconstituirlos en diclorometano en lugar de hexano. Lo anterior se hizo por dos razones: en primer lugar, porque el diclorometano se evapora más rápido, de este modo, la medición no se ve afectada por cambios en la concentración de disolvente mientras se está llevando a cabo; pero principalmente, se eligió ese disolvente porque comparando los espectros de infrarrojo de los dos líquidos mencionados (Figura 3.5), se notan claras diferencias provocadas por el enlace C-Cl en el diclorometano, con lo cual se evita atribuir incorrectamente al extracto la absorción por enlaces C-H de alcanos (Tabla 3.5).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

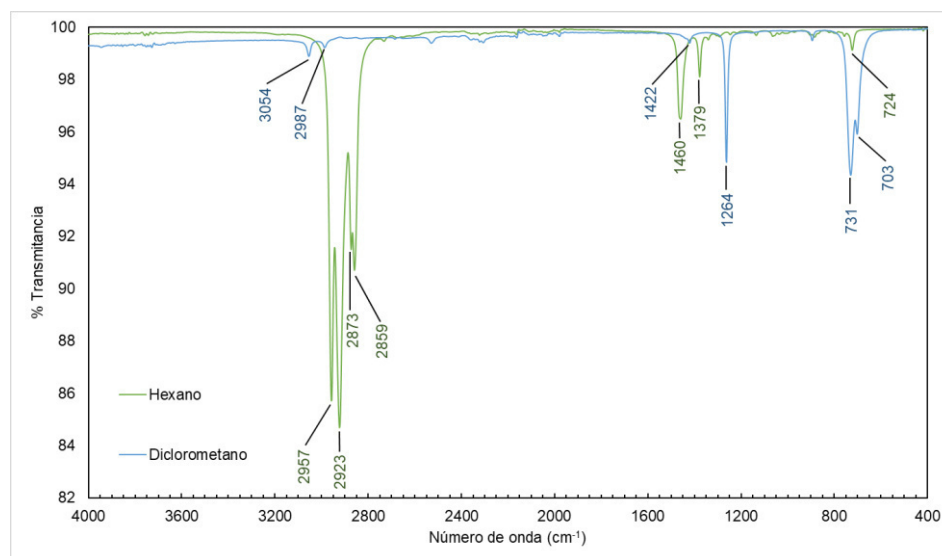


Fig. 3.5. Espectros de infrarrojo de hexano y diclorometano líquidos (obtenidos en el laboratorio con FTIR-ATR).

Tabla 3.5. Absorciones del hexano y diclorometano en el IR medio.

Disolvente	Bandas (cm ⁻¹)	Asignación ^a
Diclorometano	3054, 2987	ν CH-Halógeno
	1422	δ CH ₂ -Halógeno
	1264	ω CH ₂ -Cl
	731	γ CH ₂
	703	ν C-Cl
Hexano	2957, 2923, 2873, 2859	ν C-H
	1460, 1379	δ CH ₂ y CH ₃
	724	γ CH ₂

^a Con base en Pretsch *et al.* (2020) y Larkin (2018).

Todos los espectros de los extractos (ver Anexo A) exhiben prácticamente las mismas absorciones (Figura 3.6), en ninguno se aprecian bandas correspondientes al enlace C-Cl, es decir, el disolvente no alteró los resultados porque logró evaporarse por completo. Las señales observadas (Tabla 3.6), todas ellas relacionadas con alcanos (Pretsch *et al.*, 2020), indican la presencia de compuestos orgánicos en los extractos en concentraciones variadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

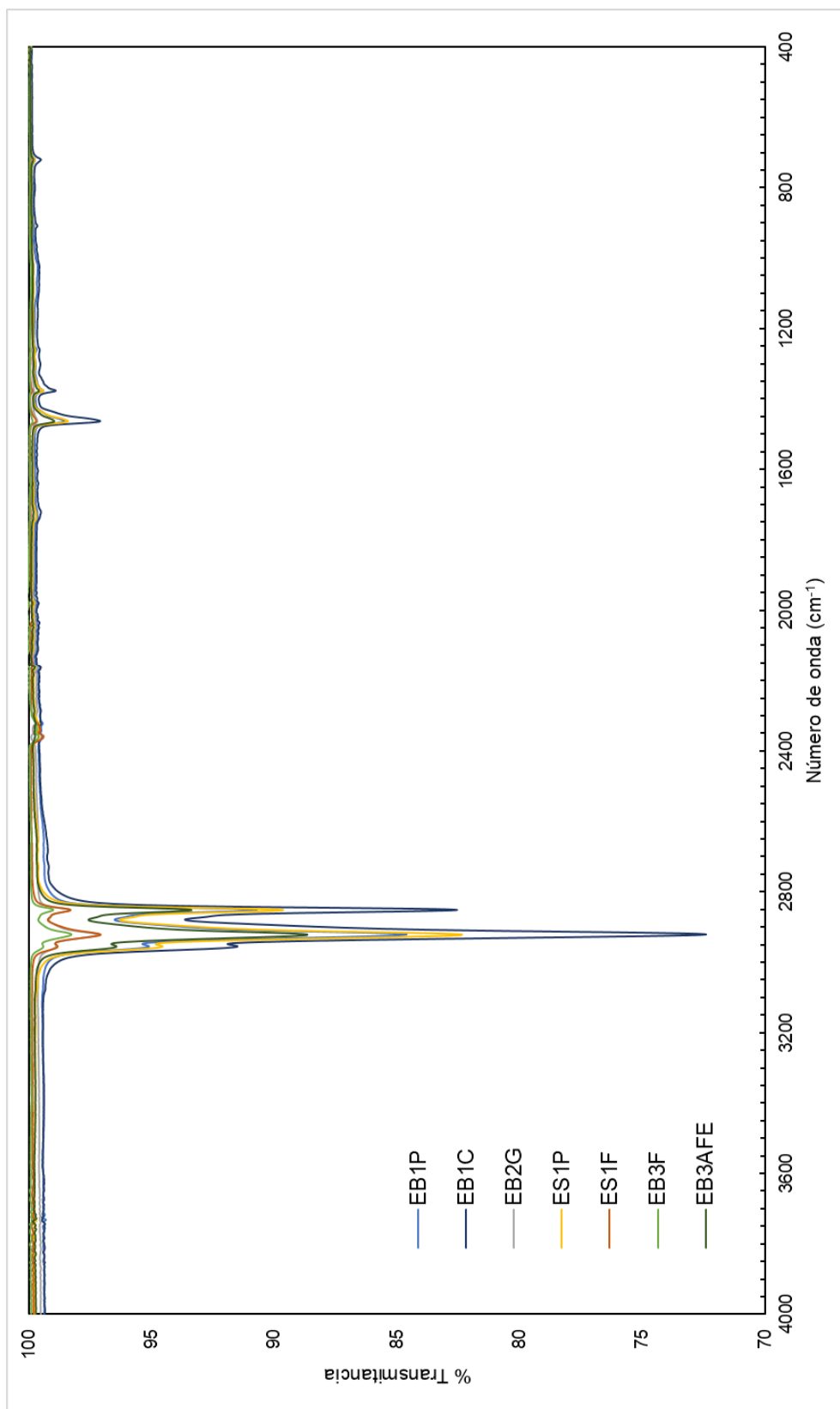


Fig. 3.6. Espectros de infrarrojo de los extractos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3.6. *Señales en los espectros de infrarrojo de los extractos.*

Muestra	Bandas (cm ⁻¹)
EB1P	2956, 2922, 2852, 1464, 1377, 721
EB1C	2956, 2921, 2852, 1464, 1377, 721
EB2G	2955, 2923, 2852, 1464, 1378
ES1P	2956, 2922, 2853, 1464, 1377, 721
ES1F	2956, 2922, 2852, 1463, 1378
EB3F	2956, 2922, 2852, 1465, 1377
EB3AFE	2956, 2922, 2852, 1464, 1377, 721

Las señales más intensas en los espectros de los extractos son las de los estiramientos C-H (Figura 3.7). Aquellas cercanas a 2922 y 2852 cm⁻¹ corresponden a este modo de vibración en metilenos en su forma asimétrica y simétrica, respectivamente. Por su parte, el cambio de la longitud de enlace en metilos causa las absorciones próximas a 2956 cm⁻¹, cuando es asimétrico, así como el hombro apreciable en torno a 2870 cm⁻¹, si es simétrico (Smith, 1998).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

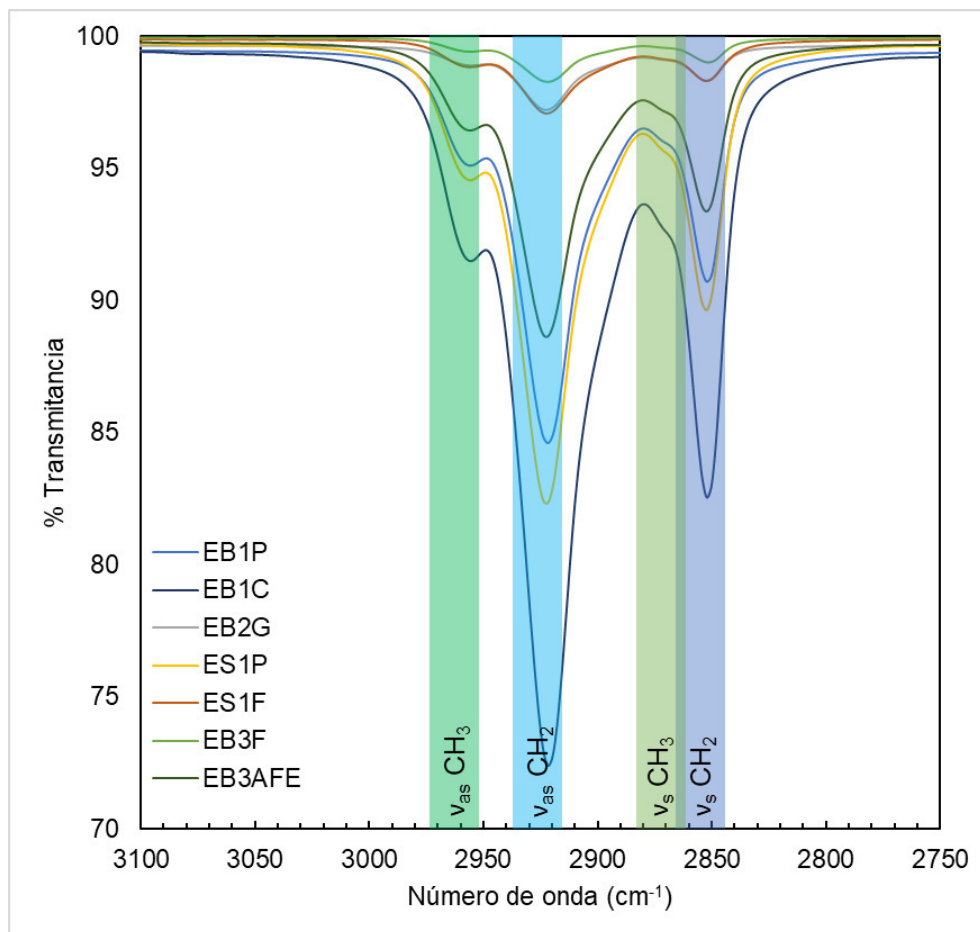


Fig. 3.7. Comparación de los espectros de infrarrojo de los extractos en la región de absorción por estiramiento de enlaces C-H.

También se aprecian las bandas propias de la flexión de los metilos y metilenos (Figura 3.8), en una de ellas ($\sim 1464\text{ cm}^{-1}$) coinciden dos señales: la de grupos CH_2 y la de la deformación asimétrica de CH_3 , mientras que la segunda ($\sim 1377\text{ cm}^{-1}$) es debida exclusivamente a la flexión simétrica de metilos. Otra absorción de alcanos observada en estos espectros es la de la vibración esquelética de metilenos, identificada en cuatro espectros (Tabla 3.5) en 721 cm^{-1} , indica la presencia de cadenas alifáticas con cuatro o más CH_2 intermedios (Pretscht *et al.*, 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

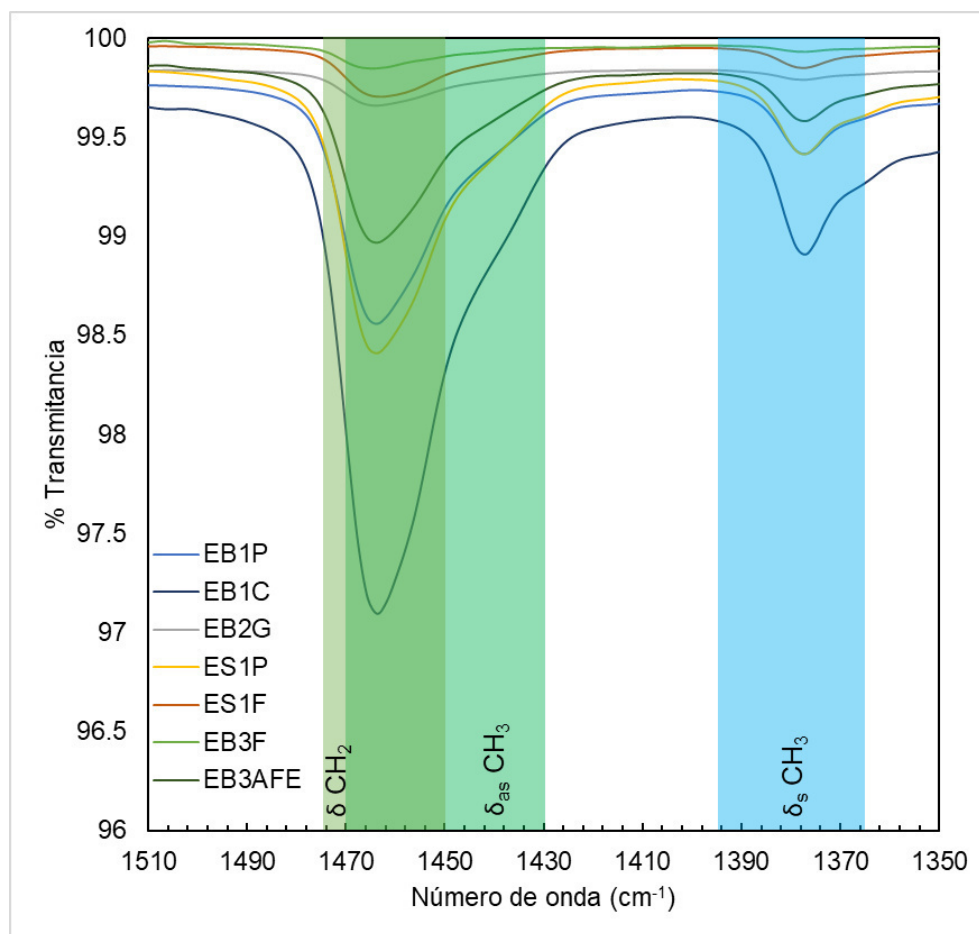


Fig. 3.8. Comparación de los espectros de infrarrojo de los extractos en la región de absorción por flexión de enlaces C-H.

Si bien, en los espectros de infrarrojo de los extractos solamente se distinguen con claridad señales relacionadas con alcanos, no se descarta la posibilidad de encontrar restos de copal. Por el contrario, la información hasta ahora expuesta concuerda en cierta medida con los espectros de referencia de resinas de *Bursera* y de los biomarcadores (Figura 3.9). Probablemente, las otras bandas típicas revisadas anteriormente, como el de enlaces C=O, no se aprecian por su baja intensidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

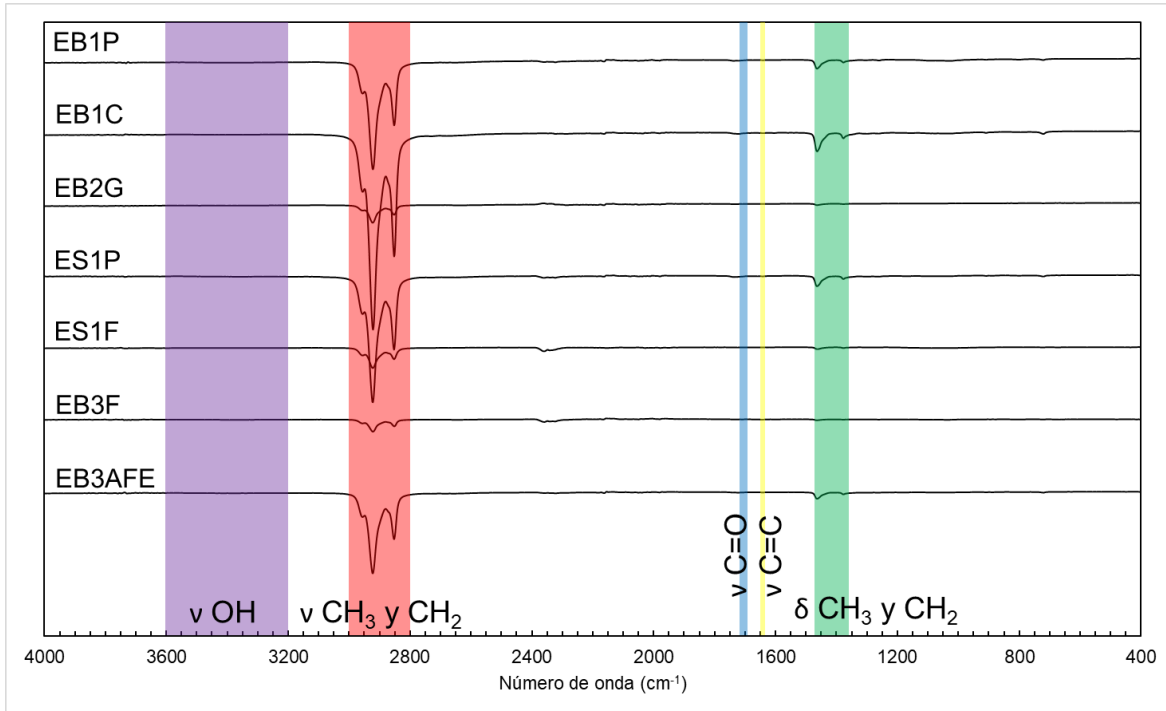


Fig. 3.9. Espectros de infrarrojo de los extractos comparados con las regiones de absorciones típicas de resinas de *Bursera*.

3.2 Análisis con cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas

Después de realizar el análisis con FTIR a los polvos de los quemadores de copal, se procedió a preparar los extractos de todas las muestras (ver secciones 2.2 y 2.3) para su inyección al sistema cromatográfico. Usando la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas se espera obtener una descripción estructural individual de los compuestos que integran a los residuos orgánicos, logrando así asignar una identidad a cada uno.

El tratamiento de los datos cromatográficos se realizó con el programa Unknowns Analysis, el cual a través de un algoritmo examina a los picos en los cromatogramas, así como a sus espectros de masas asociados, a los cuales compara con los espectros de masas de la biblioteca de referencia (NIST 14) para

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

seleccionar el de mayor coincidencia y, finalmente, otorga un número en una escala de 0 a 100 (*Match Factor*) que indica la semejanza de los espectros en cuestión.

Los resultados de la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas permitieron identificar una gran variedad de compuestos orgánicos (ver Anexo B): desde varias clases de alcanos, especies oxigenadas y nitrogenadas, diferentes tipos de terpenos, hasta algunas moléculas cloradas. Esto se refleja en los cromatogramas de los extractos, apreciándose claramente una menor abundancia de analitos en el de EB2G, en contraposición al de ES1F (Figura 3.10).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

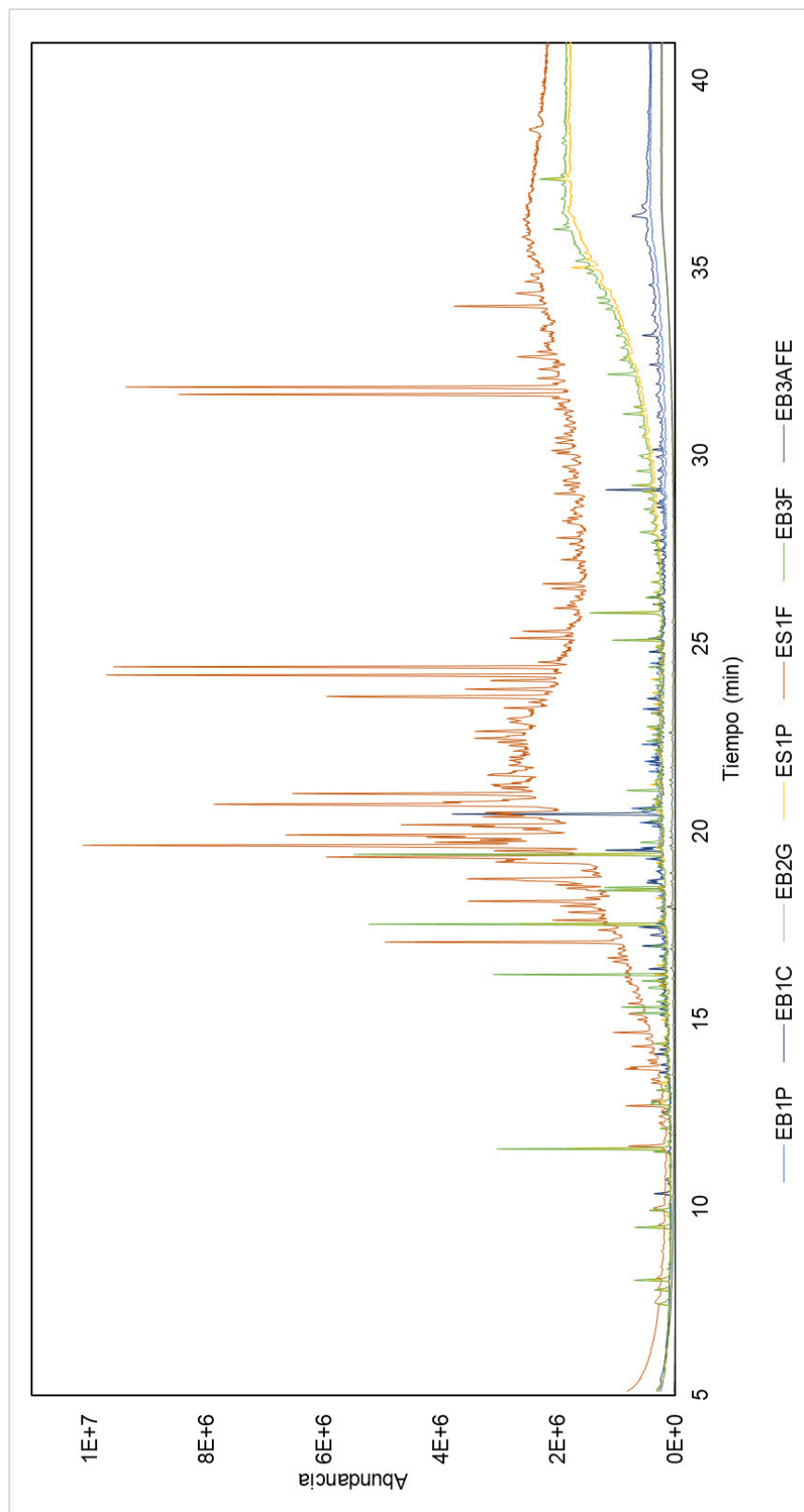


Fig. 3.10. Cromatogramas de los extractos superpuestos.

3.2.1 Identificación de materiales orgánicos arqueológicos

En un análisis de residuos orgánicos, el tipo de moléculas encontradas permite distinguir entre materiales orgánicos arqueológicos de diferentes categorías. Para la identificación de resinas naturales, grupo dentro del cual queda comprendido el copal, se utiliza a los terpenos como biomarcadores, especialmente los de 20 y 30 átomos de carbono, para diferenciar las fuentes vegetales a nivel taxonómico de familia o género (Mills y White, 1977; Stacey *et al.*, 2006). Por lo tanto, de entre todos los compuestos detectados mediante la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas, los adecuados para buscar indicios de la quema de copal dentro de las piezas arqueológicas son los terpenos.

3.2.1.1 Biomarcadores de copal detectados en los extractos

Aunque por su bajo punto de ebullición, los monoterpenos y sesquiterpenos rara vez permanecen en un objeto durante largos periodos de tiempo, sí se ha llegado a encontrar, por ejemplo, canfeno y junipeno (Figura 3.11) en residuos orgánicos en vasijas prehispánicas (Díaz, 2016). No obstante, para fines de esta investigación es más viable buscar compuestos menos volátiles que puedan haberse conservado adsorbidos en el barro pese a la alta temperatura ocasionada por la combustión. En vista de lo anterior se optó por usar a los triterpenos con esqueleto de ursano, oleanano y lupano (Tabla 3.7) como biomarcadores, pues además otros estudios han logrado identificar copal satisfactoriamente gracias a estas moléculas (Lucero, 2012; Lucero-Gómez *et al.*, 2014a; Stacey *et al.*, 2006).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

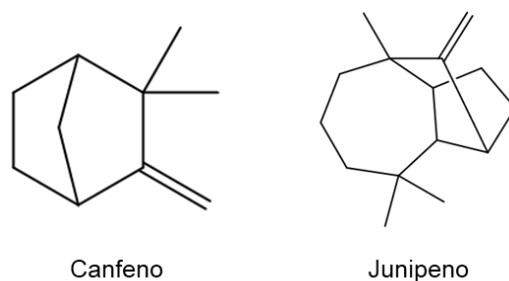


Fig. 3.11. Estructuras moleculares del canfeno y del junipeno.

Tabla 3.7. Algunos compuestos utilizados como biomarcadores de copal.

Esqueleto	Estructura	Grupo funcional (R)	Compuesto
Ursano		Alcohol	α -Amirina 3- <i>epi</i> - α -Amirina
		Cetona	α -Amirona
Oleanano		Alcohol	β -Amirina 3- <i>epi</i> - β -Amirina
		Cetona	β -Amirona
Lupano		Alcohol	Lupeol 3- <i>epi</i> -Lupeol
		Cetona	Lupenona

Usualmente, los compuestos con grupos hidroxilo, tal como las amirinas y el lupeol, se derivatizan con algún reactivo sililante para anular las interacciones tipo puente de hidrógeno (Figura 3.12), lo cual favorece su evaporación en el inyector

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

del cromatógrafo de gases, pero también supone un incremento del tiempo, reactivos y materiales necesarios para el análisis (Smith, 2003).

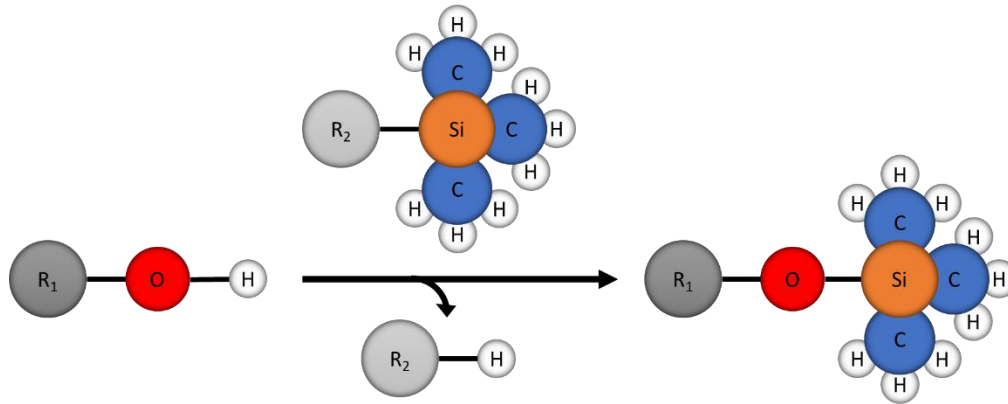


Fig. 3.12. *Reacción general de silylación.* Ilustración hecha por el autor.

A fin de valorar la necesidad de la derivatización, los extractos de los polvos de quemadores se analizaron mediante CG-EM directamente después de su preparación, logrando la detección de moléculas relacionadas con las resinas de especies *Bursera* en cuatro extractos: los dos de Brasero1, ES1P y EB3F (Tabla 3.8); de esta manera se demostró que no es imprescindible derivatizar. Entre los referidos compuestos hay un lupano, dos oleananos y un ursano, los cuales eluyeron entre los 33 y 37 minutos (Figura 3.13). Cabe señalar que las diferencias en los tiempos de retención para un mismo compuesto son atribuibles a los cambios en la longitud de la columna cromatográfica por los cortes realizados durante su instalación, pues las muestras no fueron inyectadas el mismo día.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3.8. *Biomarcadores de copal detectados en los extractos.*

Compuesto	Extracto						
	EB1P	EB1C	EB2G	ES1P	ES1F	EB3F	EB3AFE
Acetato de lupeol		•					
Acetato de β -amirina	•						
α -Amirina		•		•			
β -Amirona		•		•		•	

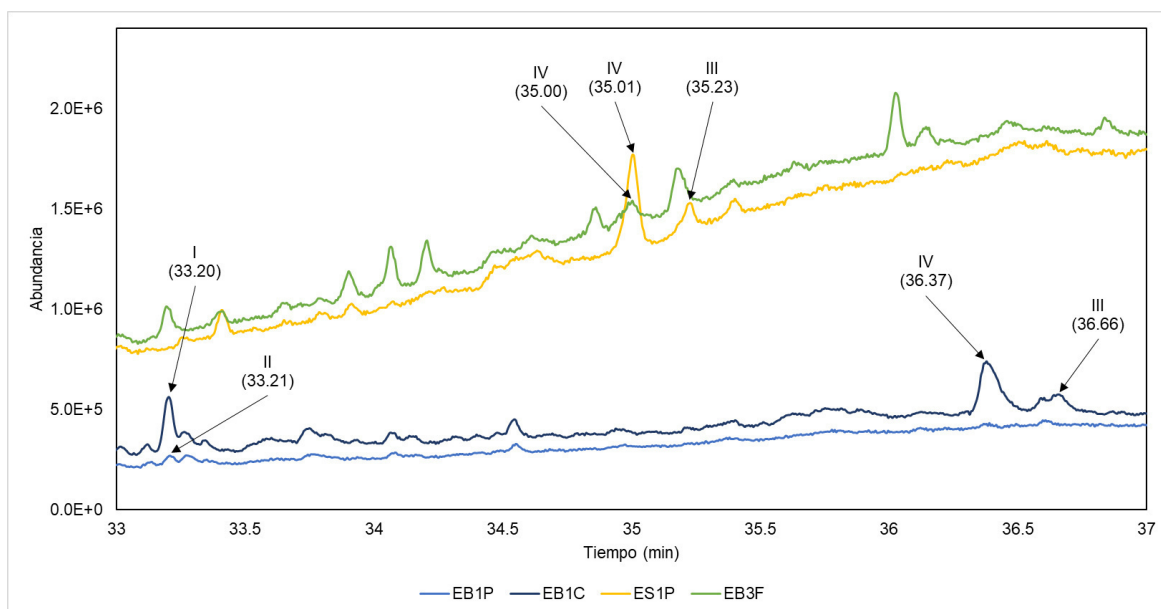


Fig. 3.13. *Ubicación de los biomarcadores de copal en los cromatogramas de los extractos.* I, acetato de lupeol; II, acetato de β -amirina; III, α -amirina; IV, β -amirona; tiempos de retención entre paréntesis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tanto la α -amirina como la β -amirina, componentes de las resinas frescas, fueron encontrados en los extractos, lo cual expresa su capacidad para perdurar a lo largo del tiempo. No ocurre así con la β -amirina, pues se ha demostrado su susceptibilidad a ser descompuesta por efecto de la luz y del calor (De la Cruz-Cañizares *et al.*, 2005). En cuanto a los biomarcadores acetilados: gracias al análisis mediante CG-EM de resina de *Bursera bipinnata* quemada a fuego directo, se determinó que el acetato de β -amirina se produce durante la combustión del copal, por lo tanto, probablemente el acetato de lupeol también se origine bajo esas condiciones (Reyes, 2022).

A pesar de ser compuestos diferentes, los espectros de masas de la α -amirina y β -amirina obtenidos por ionización electrónica a 70 eV tienen su pico base en 218 m/z, además en ambos están presentes los fragmentos con relación de masa-carga 203, 189 y 95, en proporciones variables. Una diferencia sobresaliente, útil para distinguir entre una amirina y una amirina, es el ion molecular: 426 m/z para las amirinas ($C_{30}H_{50}O$) y 424 m/z para las amirinas ($C_{30}H_{48}O$), correspondientes a las masas moleculares de los compuestos. Así mismo, la distinción de un ursano con un oleanano se hace con base en el perfil espectral por debajo de 218 m/z, por ejemplo, el pico en 203 m/z es más intenso en el espectro de β -amirina que en el de su análogo alfa (De la Cruz-Cañizares *et al.*, 2005).

El hecho de que las moléculas con esqueleto de ursano y oleanano compartan ciertos rasgos espectrales es debido a la similitud de su estructura molecular, en concreto, la disposición de los anillos alifáticos y la posición de la insaturación. Por consiguiente, cuando se exponen al haz de electrones, los compuestos de ambos grupos sufren la ruptura de anillo conocida como reacción retroDiels-Alder (rDA), dando lugar al distintivo fragmento en 218 m/z. Si este ion experimenta la pérdida de un grupo metilo o un etilo origina los picos en 203 y 189 m/z, respectivamente, y de la escisión de esta última especie se genera una con relación masa-carga de 95 (Figura 3.14) (Modugno *et al.*, 2006; Oliveira *et al.*, 2022).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

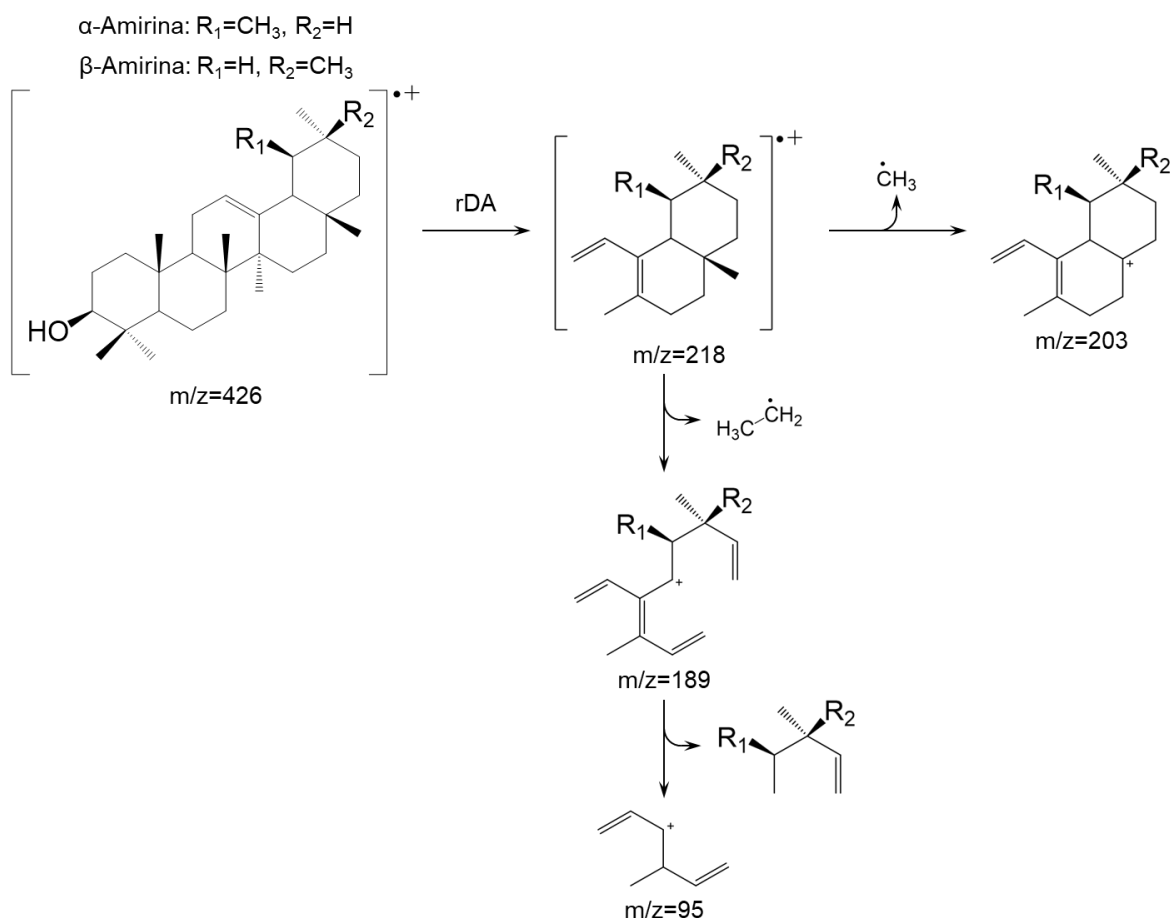


Fig. 3.14. Ruta de fragmentación de la α - y β -amirina.

Los espectros de masas de los componentes señalados por Unknowns analysis como α -amirina en EB1C y ES1P, concuerdan en gran medida con los espectros de referencia de la biblioteca NIST 14 (Figura 3.15), del mismo modo sucede con los analitos identificados como β -amirina en EB1C, ES1P y EB3F (Figura 3.16). En todos ellos se aprecian los picos ya comentados, incluyendo al del ion molecular, en algunos también es visible uno típico de estas moléculas, correspondiente a la pérdida de un metilo, 15 unidades por debajo de la masa molecular del compuesto (Modugno *et al.*, 2006).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

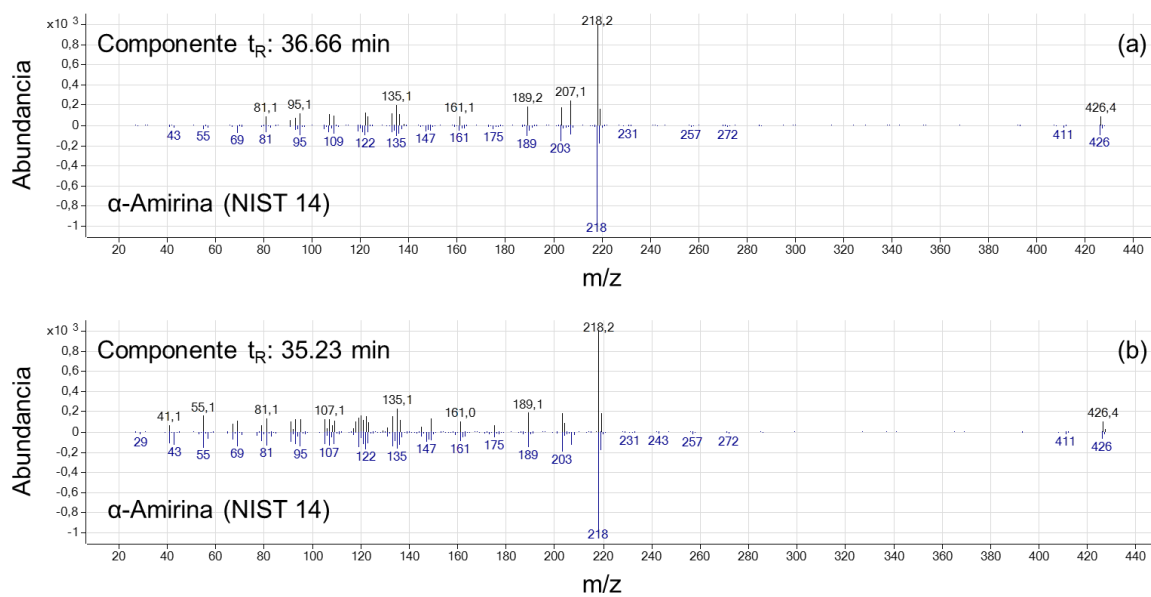


Fig. 3.15. Espectro de referencia de la α -amirina comparado con los componentes identificados como tal en (a) EB1C y (b) ES1P.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

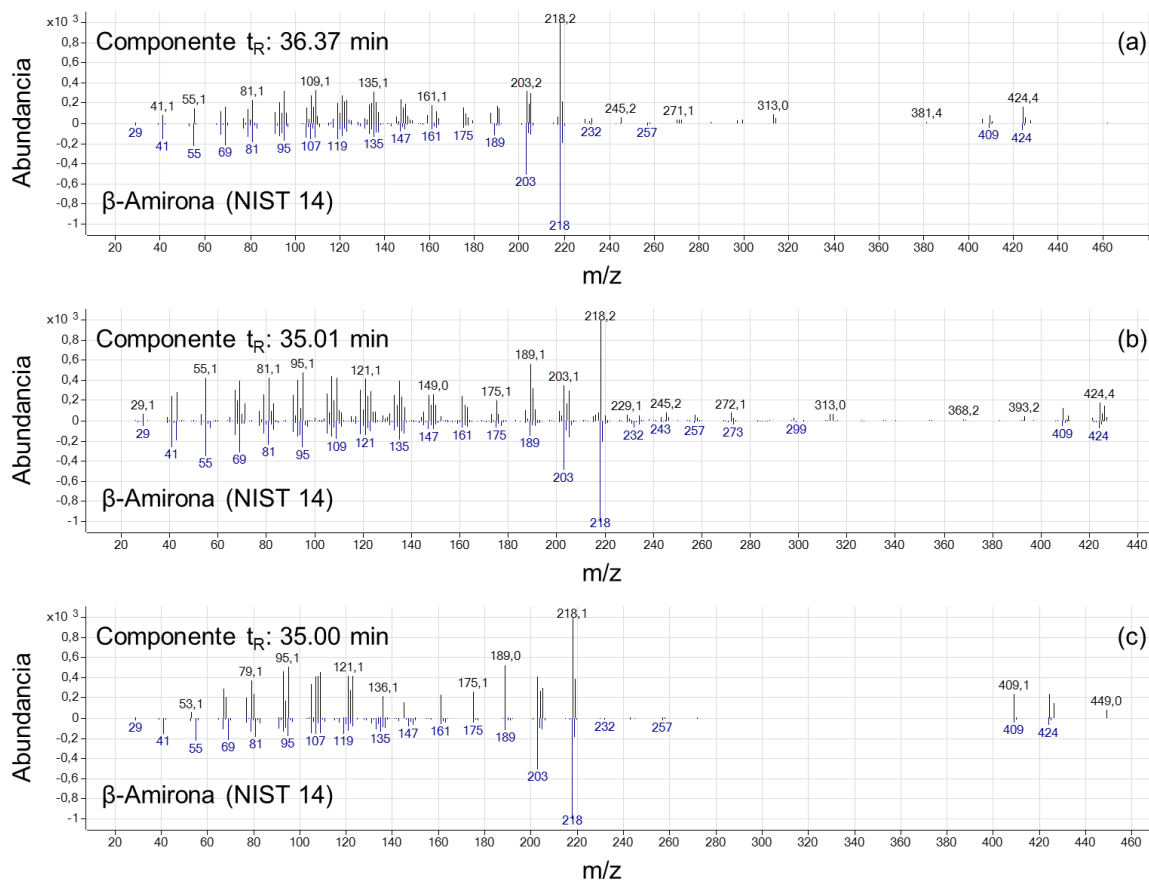


Fig. 3.16. Espectro de referencia de la β -amirona comparado con los componentes identificados como tal en (a) EB1C, (b) ES1P y (c) EB3F.

El espectro de masas de un componente de EB1P (Figura 3.17) y uno de EB1C (Figura 3.18) tienen el aspecto de pertenecer a un biomarcador de copal, sin embargo, los dos carecen de ion molecular en 426 o 424 m/z. El programa Unknowns Analysis señaló al primero de estos analitos como acetato de β -amirina y al segundo como acetato de lupeol (Figura 3.19). La masa molecular de ambas especies es 468 Da, lo cual es congruente con la presencia del pico en 408 m/z procedente de la pérdida de una molécula de ácido acético (60 Da) mediante un reordenamiento de McLafferty (Modugno *et al.*, 2006; Pretsch *et al.*, 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

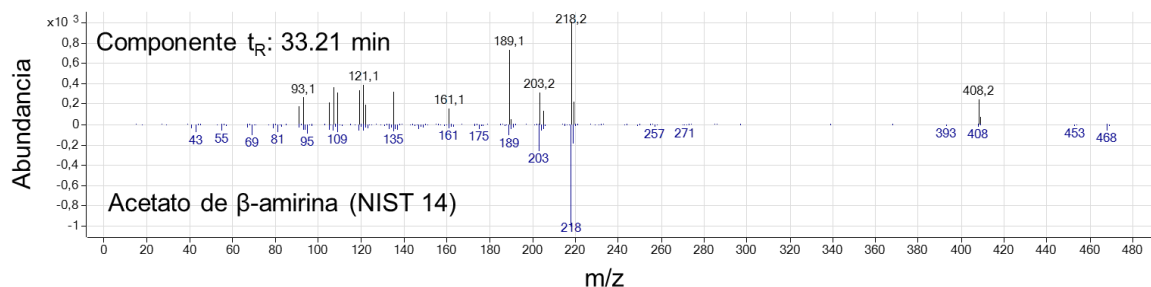


Fig. 3.17. Espectro de referencia del acetato de β -amirina comparado con el componente identificado como tal en EB1P.

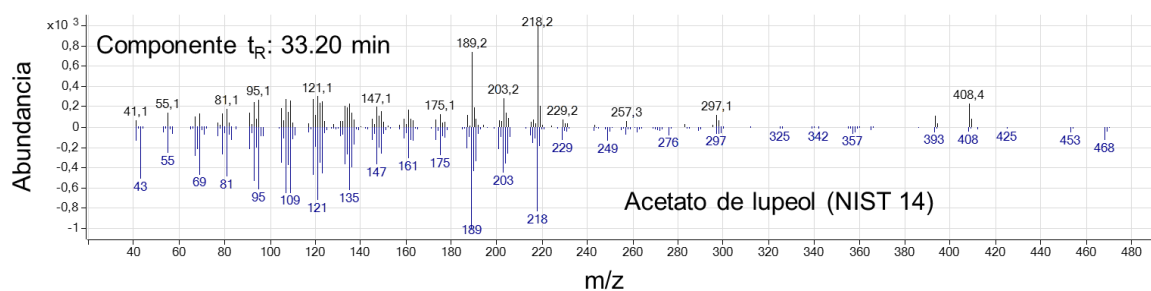


Fig. 3.18. Espectro de referencia del acetato de lupeol comparado con el componente identificado como tal en EB1C.

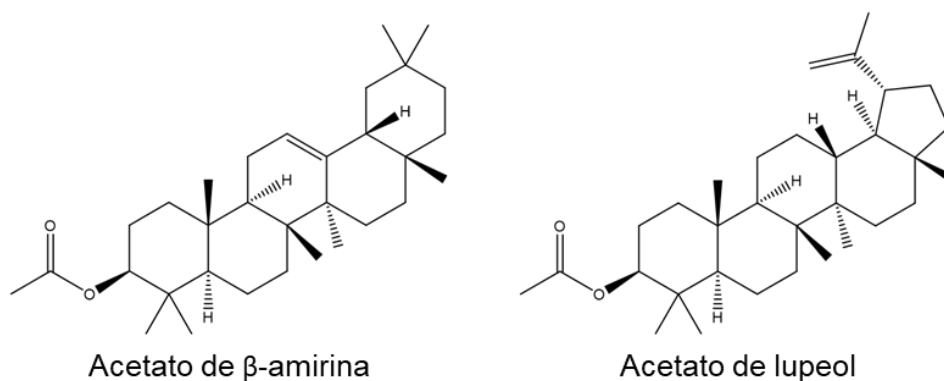


Fig. 3.19. Estructuras moleculares del acetato de β -amirina y del acetato de lupeol.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los ursanos, oleananos y lupanos listados en la Tabla 3.7 no son exclusivos del género *Bursera*, existen otras especies vegetales cuyas resinas también contienen algunos de ellos, como el mástique de *Pistacia lentiscus* (Pachi *et al.*, 2020) y el olíbano de *Boswellia carterii* (Baeten *et al.*, 2014); por lo cual se recomienda considerar el contexto de los objetos analizados antes de asegurar la presencia de copal basándose en la detección de aquellos (De la Cruz-Cañizares *et al.*, 2005). Sin embargo, en lo referente a los quemadores implicados, no se tiene conocimiento de un uso posterior a su hallazgo, además, las plantas antes mencionadas no son nativas de Mesoamérica. Siendo ese el caso, lo más probable es que el acetato de lupeol, el acetato de β -amirina, la α -amirina y la β -amirona sí provengan del contacto del sahúmador y los braseros con copales de *Bursera*.

3.2.1.2 Biomarcadores de pino, de bitumen e hidrocarburos aromáticos policíclicos detectados en los extractos

El análisis mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas también permitió la identificación de biomarcadores de otro tipo de materiales orgánicos e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en cinco extractos de los polvos de quemadores de copal (Tabla 3.9). Los cromatogramas con mayor número de analitos de este tipo corresponden a Sahúmador1 (Figura 3.20), en contraste con la muestra de Brasero2, en cuyo extracto no se halló alguno de estos compuestos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3.9. *Marcadores químicos varios detectados en los extractos.*

Categoría	Compuesto	Extracto						
		EB1P	EB1C	EB2G	ES1P	ES1F	EB3F	EB3AFE
Resina de pino	Dehidroabietato de metilo		•		•	•	•	
	Dehidroabietino					•		
Bitumen	Fitano	•			•	•		
	Pristano	•						
HAPs	2-Isopropil-10-metilfenantreno	•	•		•	•		
	8-Isopropil-1,3-dimetilfenantreno	•	•					
	Cadaleno		•					
	Fenantreno				•			
	Fluoranteno				•			

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

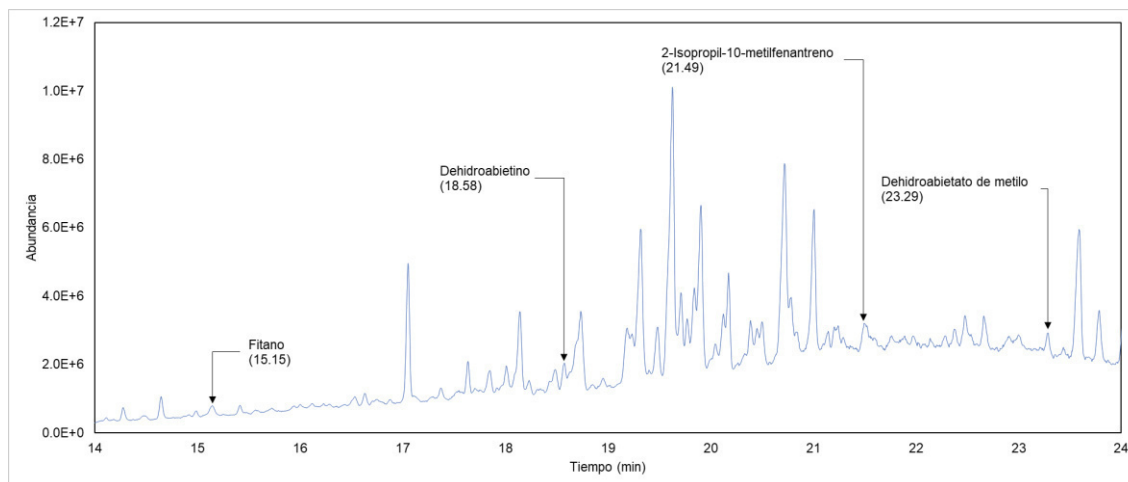


Fig. 3.20. Biomarcadores de resinas de pino, bitumen e hidrocarburos aromáticos policíclicos en el cromatograma de ES1F. Tiempos de retención entre paréntesis.

En EB1C, EB3F y los dos extractos de Sahumador1 se encontró dehidroabietato de metilo, y dehidroabietino, únicamente en ES1F. Las dos moléculas referidas son producto de la deshidrogenación y descarboxilación térmica de ácidos abiéticos (Figura 3.21) (Evershed *et al.*, 1985; Robinson *et al.*, 1987), estos compuestos diterpénicos son comunes en las resinas de la familia *Pinaceae*, a la cual pertenece el género *Pinus* (Mills y White, 1977). Su presencia puede ser indicador de la combustión de materiales resinosos de pinos junto con el copal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

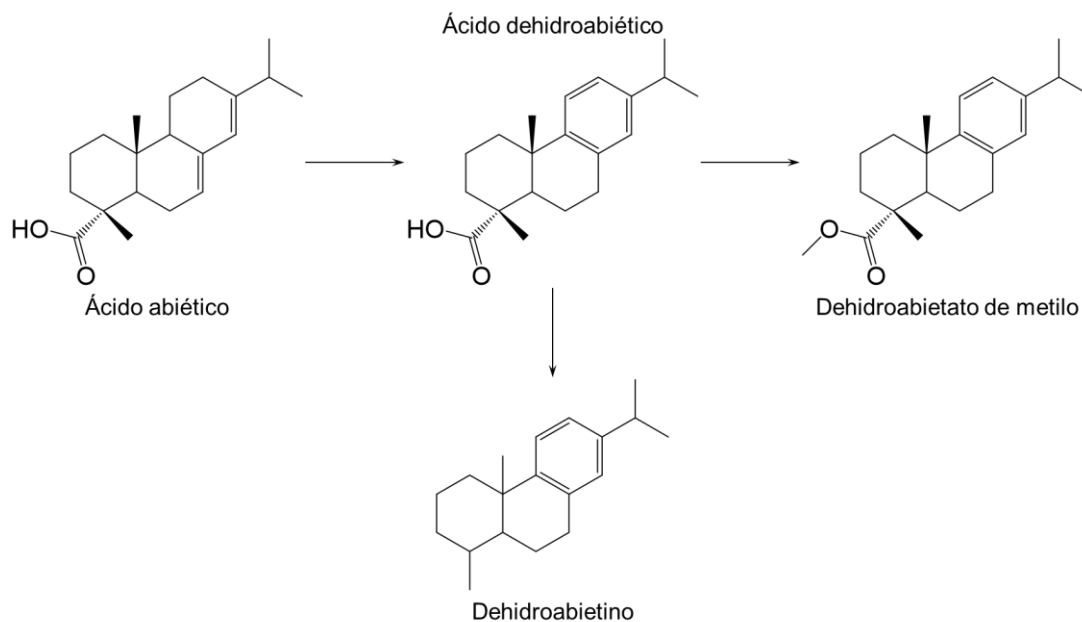


Fig. 3.21. Formación de dehidroabietato de metilo y dehidroabietino a partir de ácido abiético.

Cuando se encuentran juntos el fitano y el pristano (Figura 3.22), son una potencial huella de bitumen o de petróleo (Brooks *et al.*, 1969), en este sentido, hay una posibilidad de que en los polvos de los quemadores haya algún material de esta clase, sin embargo, antes de poder asegurarlo se deben llevar a cabo otro tipo de análisis. Por ejemplo, Connan (2012) propuso una metodología para comprobar la presencia de bitumen en cerámicas arqueológicas basada en la extracción de hidrocarburos y posterior separación en fracciones para su análisis.

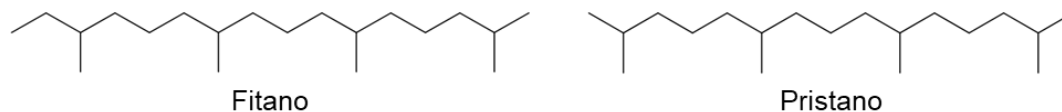


Fig. 3.22. Estructuras moleculares del fitano y del pristano.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los polvos de los quemadores Brasero1 y Sahumador1 se encontraron hidrocarburos aromáticos policíclicos (Figura 3.23), los cuales se generan a través de la combustión incompleta de biomasa, o bien, por su calentamiento. El fluoranteno y el fenantreno son indicadores de combustión, el segundo específicamente de madera, a su vez, el cadaleno junto con los fenantrenos alquilados señalan lo mismo, pero referente a plantas en general (Ding *et al.*, 2022). La existencia de HAPs en las muestras ayuda a constatar el uso de las piezas arqueológicas para la quema de recursos de origen vegetal dentro de ellas.

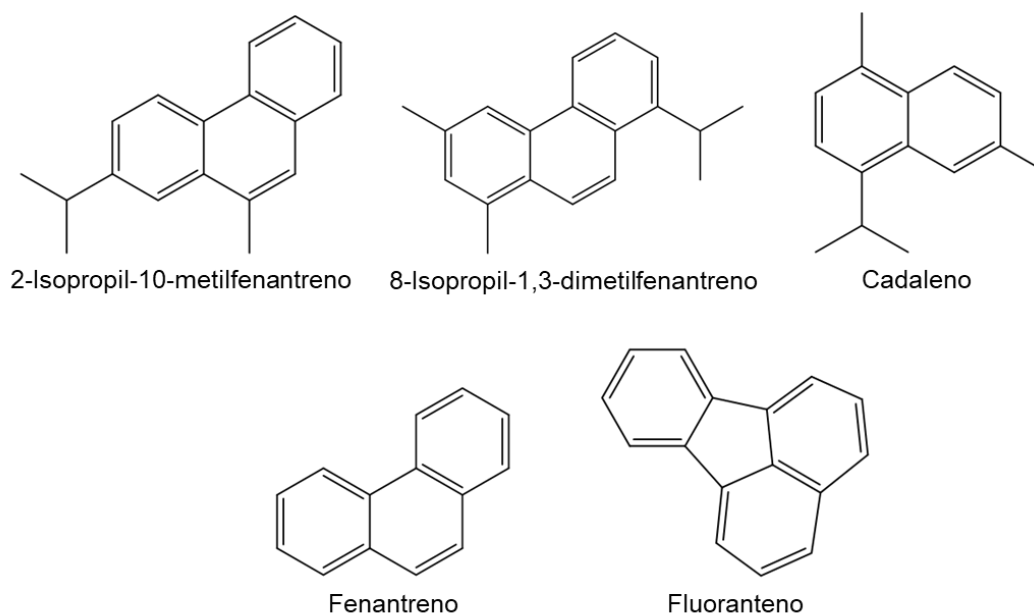


Fig. 3.23. Estructuras moleculares de los hidrocarburos aromáticos policíclicos detectados.

3.2.2 Contaminación de las muestras

Finalmente, hay un grupo de compuestos orgánicos sintéticos, no relacionados con ninguno de los materiales de interés en los análisis de residuos orgánicos, pero se les señala porque todos los extractos tuvieron alguno (Tabla

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.10), es decir, afectaron en gran medida los resultados. La mención de este fenómeno está enfocada a ubicar las vías de contaminación de muestras arqueológicas para poder evitarlas en el futuro y facilitar la identificación de biomarcadores, impidiendo que sus picos cromatográficos queden opacados por otros no deseados. Los «contaminantes» hallados se atribuyen a tres fuentes: el contacto con plástico (plastificantes), el uso de productos cosméticos por parte de quienes manipularon los quemadores (almizcles sintéticos) y el empleo de insecticidas en los lugares donde se resguardan (derivados de DDT).

Tabla 3.10. *Compuestos «contaminantes» detectados en los extractos.*

Categoría	Compuesto	Extracto						
		EB1P	EB1C	EB2G	ES1P	ES1F	EB3F	EB3AFE
Plastificantes	DEP				•	•	•	
	DEHP				•	•	•	
	DEHT		•		•		•	
	DiBP				•		•	
	DnBP	•	•	•	•	•	•	•
	TXIB	•	•		•	•	•	

DEP, ftalato de dietilo; DEHP, ftalato de di(2-etilhexilo); DEHT, tereftalato de di(2-etilhexilo); DiBP, ftalato de diisobutilo; DnBP, ftalato de dibutilo, TXIB, diisoburato de 2,2,4-trimetil-1,3-pentanodiol

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3.10. *Compuestos «contaminantes» detectados en los extractos.* (continuación)

Categoría	Compuesto	Extracto						
		EB1P	EB1C	EB2G	ES1P	ES1F	EB3F	EB3AFE
Almizcles sintéticos	Galaxolide		•				•	•
	Tonalide	•	•				•	
	Versalide				•			
Derivados de DDT	DDMU						•	
	o,p'-DDE				•			
	p,p'-DDE	•	•				•	•

DDMU, 1,1-Bis(p-clorofenil)-2-cloroetano; o,p'-DDE, 2,4'-Diclorodifenildicloroetileno; p,p'-DDE, 4,4'- Diclorodifenildicloroetileno

Tal como se muestra en la Tabla 3.10, el diisoburato de 2,2,4-trimetil-1,3-pentanodiol (TXIB), el tereftalato de di(2-etilhexilo) (DEHT) y los ftalatos (DEP, DEHP, DiBP y DnBP) (Figura 3.24), todos ellos usados como plastificantes (Wypych, 2023), fueron de los compuestos encontrados con mayor frecuencia, además, sus picos figuran entre los más visibles en los cromatogramas (Figura 3.25); en resumen, son los que más impacto tuvieron. La presencia de estas moléculas en las muestras es seguramente consecuencia de haberlas depositado dentro de las bolsas indicadas en la sección 2.2 (ver Figura 2.3), pues, por ejemplo, la capacidad de los ftalatos para migrar del plástico hacia otro medio es ampliamente conocida (Xu *et al.*, 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

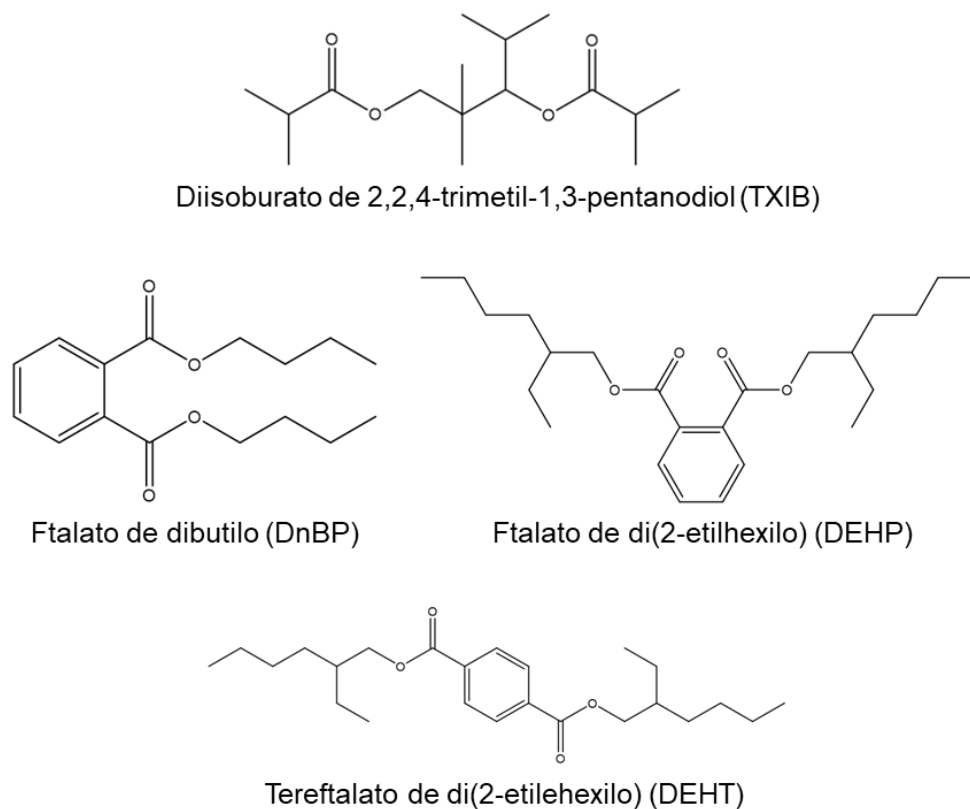


Fig. 3.24. Algunos plastificantes detectados en los extractos.

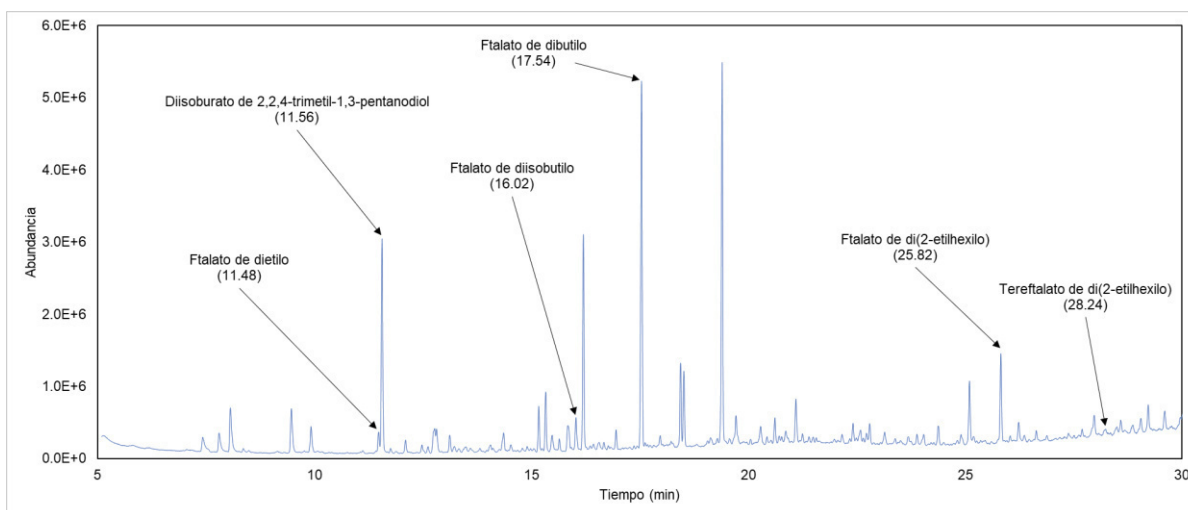


Fig. 3.25. Plastificantes identificados en EB3F. Tiempos de retención entre paréntesis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Respecto a los almizcles sintéticos, a menudo utilizados en la industria de los productos de cuidado personal como sustitutos de sustancias naturales para la preparación de fragancias (Osemwengie y Steinberg, 2001; Sumner *et al.*, 2010), se detectaron tres compuestos: Tonalide, Versalide y Galaxolide (Figura 3.26). Esto permite reparar en la necesidad de manejar todo objeto de patrimonio cultural cuidando no contaminarlo con algún cosmético, de lo contrario, la realización de análisis de residuos orgánicos podría dificultarse, especialmente si estos últimos están en mínimas cantidades.

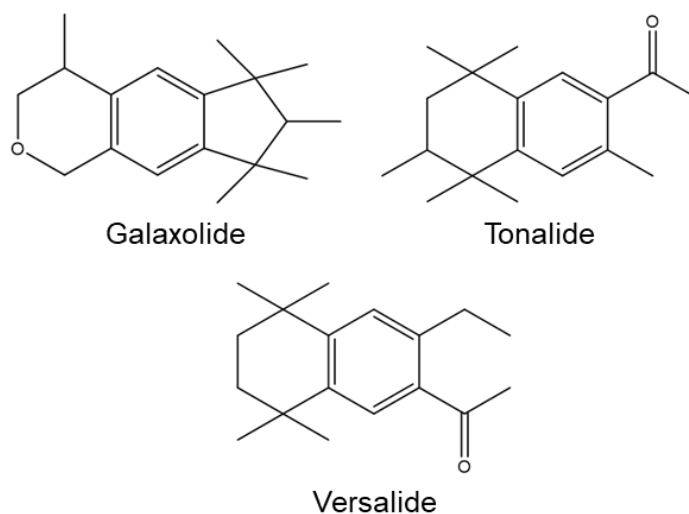


Fig. 3.26. Almizcles sintéticos detectados en los extractos.

Por último, el hallazgo de compuestos resultantes de la degradación del diclorodifeniltricloroetano (DDT), como el DDMU, el o,p'-DDE y el p,p'-DDE (Figura 3.27) (Kucher y Schwarzbauer, 2017), reveló que las condiciones del almacenamiento de las piezas también afectan a la composición de los residuos orgánicos. En este caso, dichas moléculas organocloradas sugieren el contacto de los quemadores con plaguicidas (Huang *et al.*, 2018), lo cual fue confirmado por la

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Maestra Rocío Velasco Fuentes al informar sobre algunas fumigaciones realizadas en las instalaciones del MAX.

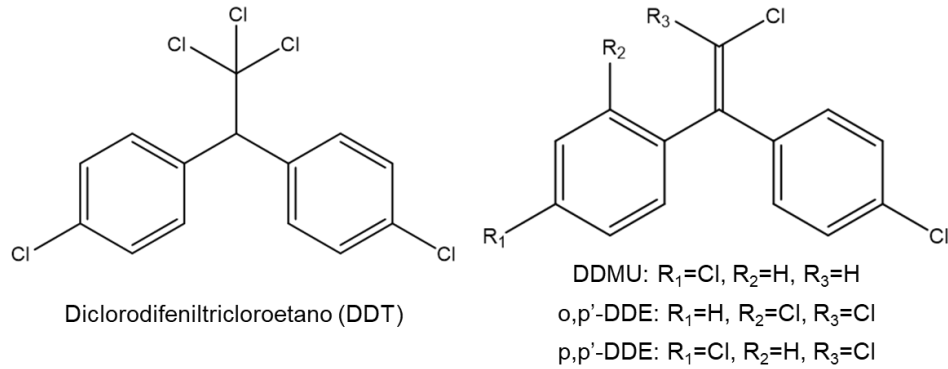


Fig. 3.27. Estructura molecular del DDT y sus derivados detectados en los extractos.

3.2.3 Propuesta acerca del proceso de constitución de los residuos orgánicos discutidos

De acuerdo con Stacey (2009), los residuos orgánicos en alfarería arqueológica son consecuencia de las contribuciones, pérdidas y transformaciones de los materiales orgánicos con los que una pieza es puesta en contacto a lo largo de su existencia, esta última dividida en cinco etapas: fabricación, uso (en ocasiones más de uno), deposición por quiebre o por otra razón, entierro y excavación con el subsecuente resguardo (Tabla 3.11).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 3.11. Factores que influyen en la constitución y conservación de un residuo orgánico.

Etapa	Contribuciones	Pérdidas	Transformaciones
Fabricación	Decoración Selladores		
Uso(s)	Contenidos	Residuos superficiales (limpieza) Volátiles (calentamiento)	Absorción Cocción Tratamiento térmico
Quiebre/Deposición	Contenidos de uso secundario		Combustión
Entierro	Materia orgánica del suelo Microbios	Lixiviación	Acción microbiana
Excavación Posexcavación	Adhesivos Huellas digitales Plastificantes	Residuos superficiales	Almacenamiento Limpieza Manipulación

Se propone que los biomarcadores de copal y de pináceas, así como los hidrocarburos aromáticos policíclicos detectados con el análisis de residuos orgánicos presentado en esta tesis, pertenecen a la etapa de uso de los objetos estudiados (Tabla 3.12); por otra parte, los plastificantes, los almizcles sintéticos y los derivados de DDT se atribuyen al periodo de excavación-posexcavación. En cuanto al fitano y al pristano, por falta de información no se llega a ninguna deducción respecto a ellos (ver sección 3.2.1.2), pero en caso de ser de origen

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

petrolífero podrían corresponder a alguna de las dos primeras etapas listadas en la Tabla 3.11.

Tabla 3.12. *Biomarcadores encontrados relacionados con el uso de los quemadores.*

Quemador	Extracto	Biomarcadores		
		BC	BP	HAP
Brasero1	EB1P	•		•
	EB1C	•	•	•
Brasero2	EB2G			
Sahumador1	ES1P	•	•	•
	ES1F		•	•
Brasero3	EB3F	•	•	
	EB3AFE			

BC=Biomarcadores de copal, BP=Biomarcadores de pináceas, HAP=Hidrocarburos aromáticos policíclicos.

Los biomarcadores detectados en los extractos son indicios de la quema de copal en Brasero1, Sahumador1 y Brasero3; proporcionando información acerca de la función de estas piezas. La α -amirina y la β -amirona confirman la presencia de resinas de *Bursera*, los biomarcadores de pináceas y los HAPs son evidencia de la combustión, finalmente, el acetato de β -amirina y el acetato de lupeol cumplen con ambas funciones citadas. Dentro de la etapa de uso, las moléculas antedichas representan las contribuciones y transformaciones, a su vez, tanto la ausencia de residuos superficiales de tamaño considerable como la falta de compuestos

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

volátiles, atañe a las pérdidas (Figura 3.28). Teniendo en cuenta lo anterior, pareciera que, de los cuatro quemadores, a Sahumador1 se le dio un mayor uso, incluso lo sugiere su apariencia física (ver Figura 2.6); por el contrario, probablemente Brasero2 no fue ocupado para quemar copal.

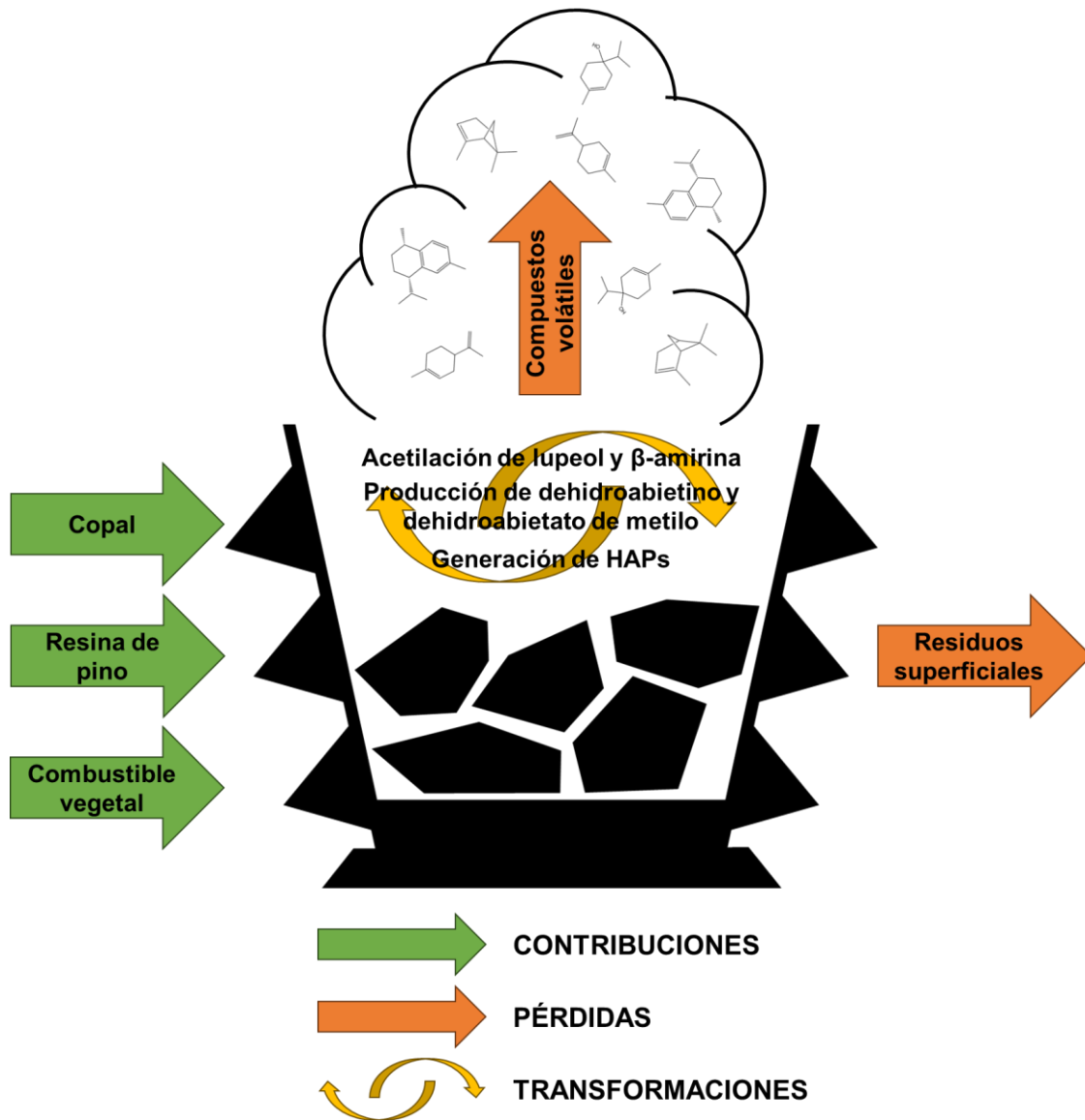


Fig. 3.28. Posibles factores involucrados en la conformación de los residuos orgánicos de Brasero1, Sahumador1 y Brasero3 durante su uso. Diagrama elaborado por el autor.

CONCLUSIONES

Gracias al análisis de residuos orgánicos llevado a cabo, se aportó evidencia del uso como quemadores de copal de tres piezas de barro procedentes de Nopiloa resguardadas en el Museo de Antropología de Xalapa (MAX): Brasero1, Sahumador1 y Brasero3. Para el cumplimiento de este objetivo sirvieron como biomarcadores de copal la α -amirina, la β -amirina, el acetato de β -amirina y el acetato de lupeol. También fueron útiles como indicadores de combustión, los dos compuestos acetilados antes mencionados, el dehidroabietato de metilo, el dehidroabietino e hidrocarburos aromáticos policíclicos como el cadaleno, el fenantreno y el fluoranteno; en su conjunto, todas estas moléculas desempeñaron el papel de biomarcadores arqueológicos.

De todas las piezas muestreadas, Sahumador1 destaca porque presenta huellas de combustión a simple vista. Adicionalmente, los espectros de infrarrojo de sus polvos exhiben algunas particularidades en el patrón de absorción de compuestos inorgánicos, lo cual pone de manifiesto una composición de barro distinta a la de los braseros. Igualmente, es de notar la abundancia de analitos detectados con CG-EM, incluyendo a los presentados como biomarcadores arqueológicos. Por consiguiente, Sahumador1 pudo haber sido el más usado de todos los quemadores de copal analizados, en cambio, según apuntan los resultados, Brasero2 posiblemente no fue utilizado.

La espectroscopía de infrarrojo permitió identificar pequeñas señales de enlaces C-H en los espectros de los polvos de los quemadores, cuya visibilidad mejoró considerablemente cuando se analizaron los extractos, aunque en ningún caso hubo indicios definitivos de la presencia de copal o sus biomarcadores. En los espectros de infrarrojo de los polvos se observaron principalmente absorciones de especies inorgánicas, notando diferencias en el grado de hidratación de los minerales a causa de la exposición a altas temperaturas, así como una mayor abundancia de cuarzo en Sahumador1.

CONCLUSIONES

Con la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas fue posible reconocer marcadores químicos de resinas de especies de *Bursera* y *Pinaceae*, esto significa que la extracción con hexano en las condiciones referidas fue satisfactoria, sin embargo, las cantidades de biomarcadores obtenidas dificultan un poco el análisis. Asimismo, se detectaron hidrocarburos aromáticos policíclicos, biomarcadores de bitumen y compuestos orgánicos sintéticos (plastificantes, almizcles y derivados de plaguicidas) procedentes de la contaminación posterior al descubrimiento de las piezas.

Se propone a la metodología descrita en el Capítulo 2 como protocolo de análisis para la identificación de copal en bienes culturales: haciendo uso de la espectroscopía de infrarrojo en alguna de las modalidades expuestas ahí, para después extraer los compuestos orgánicos, inyectarlos en el equipo de CG-EM y, finalmente, buscar a las moléculas presentadas anteriormente como biomarcadores. Si bien la espectroscopía de infrarrojo es una técnica útil para confirmar la existencia de residuos orgánicos, es importante considerar que puede dar positivo a compuestos orgánicos aun cuando no son de interés arqueológico, o comunicar un falso negativo, por esto último, es mejor examinar directamente los extractos. Del mismo modo, se aconseja evitar almacenar las piezas y/o muestras en contenedores de plástico, manipularlas utilizando guantes para no contaminarlas con algún cosmético y no exponerlas a productos de limpieza.

Los residuos orgánicos tratados en este análisis corresponden a compuestos adsorbidos en cerámica, según el tipo de residuo y la fuente, respectivamente. La categoría de materiales orgánicos en arte y arqueología relacionada con esta investigación es la de resinas naturales, subcategoría de resinas vegetales; descubriendo indicios de exudados diterpénicos y triterpénicos. En esta disertación puede advertirse cómo los análisis de residuos orgánicos permiten comprobar los testimonios de personajes antiguos e incluso llegar a descubrir determinadas particularidades con relación a ellos. A este respecto, la presente tesis ofrece pruebas que respaldan los relatos de cronistas del siglo XVI sobre la costumbre de quemar copal a manera de incienso entre los pueblos mesoamericanos.

PERSPECTIVAS

- I. Utilizar la información obtenida en este análisis de residuos orgánicos para complementar las investigaciones arqueológicas relacionadas con la cultura del Centro de Veracruz o el México prehispánico en general.
- II. Realizar análisis de resinas certificadas de especies *Bursera* y *Protium copal* mediante espectroscopía de infrarrojo y cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas, tanto antes como después de su combustión.
- III. Desarrollar métodos orientados a la identificación de otros materiales ofrendados en los rituales (pericón, sangre, hule, papel), así como de aditivos que pudieran haberse usado en la fabricación de los quemadores.
- IV. Profundizar en la caracterización de los materiales inorgánicos para poder especificar más detalles acerca de la manufactura de las piezas, como son: tipo de barro, cocimiento, proporción de minerales, etcétera.
- V. Continuar indagando sobre las vías de contaminación que afectan a los residuos orgánicos en patrimonio cultural, establecer protocolos de acción para evitarla y hacer divulgación acerca de este tema.

REFERENCIAS

- Abad-Fitz, I., Maldonado-Almanza, B., Aguilar-Dorantes, K. M., Sánchez-Méndez, L., Gómez-Caudillo, L., Casas, A., Blancas, J., García-Rodríguez, Y. M., Beltrán-Rodríguez, L., Sierra-Huelsz, J. A., Cristians, S., Moreno-Calles, A. I., Torres-García, I. y Espinosa-García, F. J. (2020). Consequences of traditional management in the production and quality of *Copal* resin (*Bursera bipinnata* (Moc. & Sessé ex DC.) Engl.) in Mexico. *Forests*, 11(9): 991.
- Abejz, L. J. (2012). *El proyecto del parque ecoarqueológico de Xoclán, Mérida, Yucatán. Propuesta metodológica para la investigación arqueológica de un sitio maya en un espacio urbano* (tesis doctoral). Universitat de Barcelona, Barcelona, España.
- Acevedo, M., Nuñez, P., González-Maya, L., Cardoso, A. y Villarreal, M. L. (2015). Cytotoxic and anti-inflammatory activities of *Bursera* species from Mexico. *Journal of Clinical Toxicology*, 5(1): 232.
- Anaya, A. L., Mata, R., Rivero-Cruz, F., Hernández-Bautista, B. E., Chávez-Velasco, D. y Gómez-Pompa, A. (1999). Allelochemical potential of *Metopium brownei*. *Journal of Chemical Ecology*, 25(1), 141-156.
- Antúnez-Mojica, M., Romero-Estrada, A., Hurtado-Díaz, I., Miranda-Molina, A. y Alvarez, L. (2021). Lignans from *Bursera fagaroides*: Chemistry, pharmacological effects and molecular mechanism. A current review. *Life*, 11(7): 685. *
- Arnold, P. J. (1994). An overview of Southern Veracruz archaeology. *Ancient Mesoamerica*, 5(2), 215-221.
- Ávalos, A. y Pérez-Urria, E. (2009). Metabolismo secundario de plantas. *Reduca (Biología)*, 2(3), 119-145.
- Azcón-Bieto, J. y Talón, M. (2013). *Fundamentos de fisiología vegetal*. McGraw Hill-Interamericana.
- Baeten, J., Deforce, K., Challe, S., De Vos, D. y Degryse, P. (2014). Holy smoke in medieval funerary rites: chemical fingerprints of frankincense in southern Belgian incense burners. *PLoS ONE*, 9(11): 113142.
- Berna, F., Behar, A., Shahack-Gross, R., Berg, J., Boaretto, E., Gilboa, A., Sharon, I., Shalev, S., Shilstein, S., Yahalom-Mack, N., Zorn, J. R. y Weiner, S. (2007). Sediments exposed to high temperatures: reconstructing pyrotechnological

REFERENCIAS

- processes in Late Bronze and Iron Age Strata at Tel Dor (Israel). *Journal of Archaeological Science*, 34(3), 358-373.
- Blancas, J., Abad-Fitz, I., Beltrán-Rodríguez, L., Cristians, S., Rangel-Landa, S., Casas, A., Torres-García, I. y Sierra-Huelsz, J. A. (2022). Chemistry, biological activities, and uses of copal resin (*Bursera* spp.) in Mexico. En Murthy, N. H. (Ed.), *Gums, resins and latexes of plant origin*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76523-1_21-1
- Bouchonnet, S. (2013). *Introduction to GC-MS coupling*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b13910>
- Brooks, J. D., Gould, K. y Smith, J. W. (1969). Isoprenoid hydrocarbons in coal and petroleum. *Nature*, 222, 257-259.
- Campos, J. (2022). *Estudio cromatográfico y espectroscópico de la Castilla elastica: material utilizado en la fabricación de pelotas de hule para el juego de cadera mesoamericano* (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Carro, A. M. y Lorenzo R. A. (2011). *Química analítica: materiales docentes: grado de Ingeniería Química, 2º curso*. Universidade, Servizo de Publicacións e Intercambio Científico.
- Case, R. J., Tucker, A. O., Maciarello, M. J. y Wheeler, K. A. (2003). Chemistry and ethnobotany of commercial incense copals, copal blanco, copal oro, and copal negro, of North America. *Economic Botany*, 57(2), 189-202.
- Castillo, D. A. (2016). El uso del copal en la Península de Yucatán. *Desde el Herbario CICY*, 8, 73-76.
- Chávez, L. J. (2019). *Identificación mediante técnicas analíticas de residuos orgánicos en construcciones de tierra en sitios prehispánicos de México y Guatemala, ubicados en distintos ambientes* (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Christian, G. D. (2009). *Química analítica*. McGraw Hill.
- Colombini, M. P. y Modugno, F. (Eds.). (2009). *Organic mass spectrometry in art and archaeology*. Wiley.
- Colombini, M. P., Giachi, G., Modugno, F y Ribechini, E. (2005). Characterisation of organic residues in pottery vessels of the Roman age form Antinoe (Egypt). *Microchemical Journal*, 79, 83-90.
- Connan, J. (2012). *Le bitume dans l'Antiquité*. Editions Errance.

REFERENCIAS

- Correa-Ascencio, M., Robertson, I. G., Cabrera-Cortés, O., Cabrera-Castro, R. y Evershed, R. P. (2014). Pulque production from fermented agave sap as a dietary supplement in Prehispanic Mesoamerica. *PNAS*, 111(39), 14223-14228.
- Cruz, K. G. (2019). *Desarrollo de una metodología analítica por cromatografía de líquidos de alta eficiencia acoplada a espectrometría de masas para la identificación de ácido carmínico y sus metabolitos en lana teñida con grana cochinilla (Dactylopius coccus)* (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Daneels, A. (2002). *El patrón de asentamiento del periodo Clásico en la cuenca baja del río Cotaxtla, centro de Veracruz. Un estudio de caso de desarrollo de sociedades complejas en tierras bajas tropicales* (tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal, México.
- Daneels, A. (2017). El juego de pelota en el centro de Veracruz. *Arqueología Mexicana*, 146, 40-45.
- De la Cruz-Cañizares, J., Doménech-Carbó, M., Gimeno-Adelantado, J., Mateo-Castro, R. y Bosch-Reig, F. (2005). Study of Burseraceae resins used in binding media varnishes from artworks by gas chromatography-mass spectrometry and pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1093, 177-194.
- Derrick, M. R., Stulik, D. y Landry, J. M. (1999). *Infrared spectroscopy in conservation science*. The Getty Conservation Institute.
- Dettmer-Wilde, K. y Engewald, W. (Eds.). (2014). *Practical gas chromatography: A comprehensive reference*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-54640-2>
- 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). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Díaz, J. L. (2015). *Análisis preliminar de la resina de Bursera fagaroides Engl. (Burseraceae)* (tesis de licenciatura). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.
- Ding, W., Hou, D., Gan, J., Zhang, Z. y George, S. C. (2022). Aromatic hydrocarbon signatures of the late Miocene-early Pliocene in the Yinggehai Basin, South China Sea: Implications for climate variations. *Marine and Petroleum Geology*, 142: 105733.

REFERENCIAS

- Durán, D. (1579). *Historia de las Indias de Nueva España e islas de la tierra firme*. <http://bdh-rd.bne.es/viewer.vm?id=0000169486&page=1>
- Eglinton, G. y Logan, G. A. (1991). Molecular preservation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B*, 333, 315-328.
- Evershed, R. P. (2008a). Experimental approaches to the interpretation of absorbed organic residues in archaeological ceramics. *World Archaeology*, 40(1), 26-47.
- Evershed, R. P. (2008b). Organic residue analysis in archaeology: the archaeological biomarker revolution. *Archaeometry*, 50(6), 895-924.
- Evershed, R. P., Jerman, K. y Eglinton, G. (1985). Pine wood origin for pitch from the *Mary Rose*. *Nature*, 314, 528-530.
- Ferrera, T. I. y Vergara, O. J. (2012). *Estudio espectroscópico al infrarrojo de pigmentos, lacas y aglutinantes utilizados en la pintura novohispana del siglo XVI* (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal, México.
- Fronzel, J. W. (1969). Fossil elemi species identified by thin-layer chromatography. *Naturwissenschaften*, 56(5), 280.
- García, J. F. (1981). La cervelle du ciel: ethnologie du copal au Mexique. *Folklore Americano*, 32, 93-126.
- García, M. (2015). Efluvios mensajeros. El copal y el yauhtli en los sahumadores del Templo Mayor. *Arqueología Mexicana*, 135, 44-49.
- Gigliarelli, G., Becerra, J. X., Curini, M. y Marcotullio, M. C. (2015). Chemical composition and biological activities of fragrant Mexican copal (*Bursera* spp.). *Molecules*, 20(12), 22383-22394.
- Gross, J. H. (2017). *Mass spectrometry: A textbook*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-54398-7>
- Guzmán, V. H. (2022). *Caracterización de la alteración del hule (Castilla elástica) mesoamericano mediante técnicas no destructivas* (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Hamid, A. A., Aiyelaagbe, O. O., Kaneez, F., Luqman, S. y Negi, A. S. (2017). Isolation, characterization and antiproliferative evaluation of constituents from stem extracts of *Alafia barteri Oliv. Hook. F.* *Medicinal Chemistry Research*, 26(12), 3407-3416.

REFERENCIAS

- Hernández, F. (1943). *Historia de las plantas de Nueva España*. <http://www.ibiologia.unam.mx/plantasnuevaespana/index.html>
- Hernández, L. y González, C. (2002). *Introducción al análisis instrumental*. Editorial Ariel.
- Heron, C. y Evershed, R. P. (1993). The analysis of organic residues and the study of pottery use. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 5, 247-284.
- Huang, H., Zhang, Y., Chen, W., Chen, W., Yuen, D. A., Ding, Y., Chen, Y., Mao, Y. y Qi, S. (2018). Sources and transformation for dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT) and metabolites in soils from Northwest Fujian, China. *Environmental Pollution*, 235, 560-570.
- Hurst, W. J., Tarka, S. M., Powis, T. G., Valdez, F. y Hester, T. R. (2002). Cacao usage by the earliest Maya civilization. *Nature*, 418, 289-290.
- Iturbe, E. (2022). *Análisis de la composición química de ceras de abejas nativas (Melipona beecheii) y su diferenciación de Apis mellifera mediante diversas técnicas analíticas. Un estudio quimiométrico* (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Jiménez, F. A. (Coord.). (2012). *Herbolaria mexicana*. Biblioteca Básica de Agricultura.
- Jolad, S. D., Wiedhopf, R. M. y Cole, J. R. (1977). Cytotoxic agents from *Bursera morelensis* (Burseraceae): Deoxy podophyllotoxin and a new lignan, 5' Desmethoxydeoxy podophyllotoxin. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 66(6), 892-893.
- Kaplan, J., Paredes, F., Hurst, W. J., Sun, D., Stanley, B., Barba, L. y Obregon, M. (2017). Cacao residues in vessels from Chocolá, an early Maya polity in the southern Guatemalan piedmont, determined by semi-quantitative testing and high-performance liquid chromatography. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 13, 526-534.
- Koulman, A. (2003). *Podophyllotoxin: A study of the biosynthesis, evolution, function and use of podophyllotoxin and related lignans* (tesis doctoral). University of Gronigen, Groningen, Países Bajos.
- Kucher, S. y Schwarzbauer, J. (2017). DDT- related compounds as non-extractable residues in submarine sediments of the Palos Verdes Shelf, California, USA. *Chemosphere*, 185, 529-538.
- Larkin, P. J. (2018). *Infrared and Raman spectroscopy: Principles and spectral interpretation*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-00806-1>

REFERENCIAS

- León, J. L. y Pérez-Navarro, J. J. (2010). Dos nuevos taxa de *Bursera* (Bursereaceae) de Baja California Sur, México. *Acta Botánica Mexicana*, 91, 37-49.
- León, J. L., Medel, A. y Domínguez, R. (2017). A new species of *Bursera* (Burseraceae) from the East Cape Region in Baja California Sur, Mexico. *Acta Botánica Mexicana*, 118, 97-103.
- Lettieri, M. (2015). Infrared spectroscopic characterization of residues on archaeological pottery through different spectra acquisition modes. *Vibrational Spectroscopy*, 76, 48-54.
- Lettieri, M. y Giannotta, M. T. (2017). Investigations by FT-IR spectroscopy on residues in pottery cosmetic vases from archaeological sites in the Mediterranean Basin. *International Journal of Experimental Spectroscopic Techniques*, 2(1): 9.
- Levine, I. N. (2009). *Physical chemistry*. McGraw-Hill.
- Linares, E. y Bye, R. (2008). El copal en México. *Biodiversitas*, 78, 8-11.
- Lona, N. V. (2004). El copal en las ofrendas del Templo Mayor. *Arqueología Mexicana*, 67, 66-71.
- Lucero, P. (2012). *Chemical analysis of resinous materials employed in artistic pre-Hispanic Mexico: application to aztec and maya archaeological samples* (tesis doctoral). Université d'Avignon et de Pays de Vaucluse, Aviñón, Francia.
- Lucero-Gómez, P., Mathe, C., Vieillescazes, C., Bucio, L., Belio, I. y Vega, R. (2014a). 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.
- Lucero-Gómez, P., Mathe, C., Vieillescazes, C., Bucio-Galindo, L., Belio-Reyes, I. y Vega-Aviña, R. (2014b). 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.
- Madariaga, J. M. (2015). Analytical chemistry in the field of cultural heritage. *Analytical Methods*, 7(12), 4848-4876.
- Madejová, J. (2003). FTIR techniques in clay mineral studies. *Vibrational Spectroscopy*, 31(1), 1-10.
- Madejová, J. y Komadel, P. (2001). Baseline studies of the clay minerals society source clays: infrared methods. *Clays and Clay Minerals*, 49(5), 410-432.

REFERENCIAS

- Marcotullio, M. C., Curini, M. y Becerra, J. X. (2018). An ethnopharmacological, phytochemical and pharmacological review on lignans from Mexican *Bursera* spp. *Molecules*, 23(8): 1976.
- Martínez, R. D. (2022). *El copal: biología, perspectivas culturales y su identificación en piezas arqueológicas* (tesina de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Martín-Ramos, P., Fernández-Coppel, I. A., Ruíz-Potosme, N. M. y Martín-Gil, J. (2018). Potential of ATR-FTIR Spectroscopy for the classification of natural resins. *BEMS Reports*, 4(1), 3-6.
- McNair, H. M. y Miller, J. M. (2008). *Basic gas chromatography*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470480106>
- Medellín, A. (1960). Nopiloa. *La Palabra y el Hombre*, 13, 37-48.
- Medellín, A. (1987). *Nopiloa. Exploraciones arqueológicas*. Universidad Veracruzana.
- Merali, Z., Cayer, C., Kent, P., Liu, R., Cal, V., Harris, C. S. y Arnason, J. T. (2018). Sacred Maya incense, copal (*Protium copal* – Burseraceae), has antianxiety effects in animal models. *Journal of Ethnopharmacology*, 216, 63-70.
- Messina, F., Curini, M., di Sano, C., Zandra, C., Gigliarelli, G., Rascon-Valenzuela, L. A., Robles, R. E. y Marcotullio, M. C. (2015). Diterpenoids and triterpenoids from the resin of *Bursera microphylla* and their cytotoxic activity. *Journal of Natural Products*, 78(5), 1184-1188.
- Mills, J. S. y White, R. (1977). Natural resins of art and archaeology their sources, chemistry, and identification. *Studies in Conservation*, 22(1), 12-31.
- Modugno, F., Ribechini, E. y Colombini, M. P. (2006). Chemical study of triterpenoid resinous materials in archaeological findings by means of direct exposure electron ionisation mass spectrometry and gas chromatography/mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 20(11), 1787-1800.
- Mondragón, P. (2017). *Espectroscopía de infrarrojo para todos ...y 51 espectros de alimentos consumidos en México*. CIATEJ. https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion_5a43b7c09fdc1.pdf
- Monnier, G. F. (2018). A review of infrared spectroscopy in microarchaeology: Methods, applications, and recent trends. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 18, 806-823.

REFERENCIAS

- Montero, I., García, M. y López-Romero, E. (2007). Arqueometría: cambios y tendencias actuales. *Trabajos de prehistoria*, 64(1), 23-40.
- Montúfar, A. (2007). *Los copales mexicanos y la resina sagrada del Templo Mayor de Tenochtitlan*. Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Montúfar, A. (2015). Copal, humo aromático de tradición ritual mesoamericana. *Arqueología Mexicana*, 135, 64-65.
- Montúfar, A. (2016). Copal de *Bursera bipinnata*. Una resina mesoamericana de uso ritual. *TRACE*, 70, 45-77.
- Morales-Serna, J. A., Cruz-Galicia, E., García-Ríos, E., Madrigal, D., Gaviño, R., Cárdenas, J. y Salmón, M. (2013). Three new diarylbutane lignans from the resin of *Bursera fagaroides*. *Natural Products Research*, 27(9), 824-829.
- Murillo-Alvarez, J. I., Encarnación, D. R. y Franzblau, S. G. (2001). Antimicrobial and cytotoxic activity of some medicinal plants from Baja California Sur (Mexico). *Pharmaceutical biology*, 39(6), 445-449.
- Navarrete, M. (1987). Nopiloa. *La Palabra y el Hombre*, 64, 242-243. <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/2223/198764P242.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Núñez, E. R. (2019). *Análisis formal y estilístico de los braseros de Santa Cruz Atizapán. Clásico tardío (450-600 d. C.) y Epiclásico (650-900 d. C.)* (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Oliveira, R. C., Bandeira, P. N., Lemos, T. G., dos Santos, H. S., Julião, M. S.S., Marinho, E. S., da S. Lopes, F. F., de Moraes, S. M., da Hora, J. P., de Moraes Bento, A. J., Lima, I. K.C., Nogueira, C. E.S., Saraiva, G. D., Barreto, A. C.H., Braz-Filho, R. y Teixeira, A. M.R. (2022). Spectroscopic, physicochemical, and pharmacokinetic analysis of α,β -amyrin mixture obtained from *Protium heptaphyllum* (Aubl.) Marchand resin. *Journal of Molecular Structure*, 1256: 132551.
- Orta-Amaro, M. N., Rodríguez-Chávez, J. A., Belío-Reyes, I. A., Bucio, L., Arenas-Alatorre, J., Espinoza, J. L. y Flores-Grajeda, M. C. (2005). Microstructure and adhesive properties of copal composite in dental incrustations. *MRS Online Proceedings Library*, 874: 517.
- Osemwengie, L. I. y Steinberg, S. (2001). On-site solid-phase extraction and laboratory analysis of ultra-trace synthetic musks in municipal sewage effluent using gas chromatography-mass spectrometry in the full-scan mode. *Journal of Chromatography A*, 932(1-2), 107-118.

REFERENCIAS

- Pacheco, L. A. (2014). *Aplicaciones de la espectrometría de infrarrojo en la caracterización y tipificación de aditivos para la industria petrolera* (tesis de licenciatura). Instituto Politécnico Nacional, Distrito Federal, México.
- Pachi, V. K., Mikropoulou, E. V., Gkiouvetidis, P., Sifakas, K., Argyropoulou, A., Angelis, A., Mitakou, S. y Halabalaki, M. (2020). Traditional uses, phytochemistry and pharmacology of Chios mastic gum (*Pistacia lentiscus* var. *Chia*, Anacardiaceae): A review. *Journal of Ethnopharmacology*, 254: 112485.
- Pecci, A. (2014). Organic residue analysis in archaeology. En Smith, C. (Ed.), *Encyclopedia of the Global Archaeology*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0465-2_334
- Pecci, A. (2021). Análisis de residuos químicos en materiales arqueológicos: marcadores de actividades antrópicas del pasado. *Revista de Prehistòria i Antiguitat de la Mediterrània Occidental*, 52(1), 7-54.
- Peña-Morán, O. A., Villarreal, M. L., Álvarez-Berber, L., Meneses-Acosta, A. y Rodríguez-López, V. (2016). Cytotoxicity, post-treatment recovery, and selectivity analysis of naturally occurring podophyllotoxins from *Bursera fagaroides* var. *fagaroides* on breast cancer cell lines. *Molecules*, 21(8): 1013.
- Peraza-Sánchez, S. R. y Peña-Rodríguez. L. M. (1992). Isolation of picropolygamain from the resin of *Bursera simaruba*. *Journal of Natural Products*, 55(12), 1768-1771.
- Peris, J. (2007). *Estudio analítico de materiales empleados en barnices, aglutinantes y consolidantes en obras de arte mediante métodos cromatográficos y espectrométricos* (tesis doctoral). Universitat de València, Valencia, España.
- Pollard, A. M., Heron, C. y Armitage, R. A. (2017). *Archaeological chemistry*. Royal Society of Chemistry.
- Polo, L. M. (2015). *Fundamentos de cromatografía*. Dextra.
- Powis, T. G., Cyphers, A., Gaikwad, N. W., Grivetti, L. y Cheong, K. (2011). Cacao use and the San Lorenzo Olmec. *PNAS*, 108(21), 8595-8600.
- Prati, S., Sciutto, G., Mazzeo, R., Torri, C. y Fabbri, D. (2011). Application of ATR-far-infrared spectroscopy to the analysis of natural resins. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 399(9), 3081-3091.
- Pretsch, E., Bühlmann, P. y Badertscher, M. (2020). *Structure determination of organic compounds*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-62439-5>

REFERENCIAS

- Purata, S. E. (Ed.). (2008). *Uso y manejo de los copales aromáticos: resinas y aceites*. CONABIO/RAISES.
- Ramírez, M. T., Ruvalcaba, J. L. y Meehan, P. (2021). Estudio físico-químico del deterioro de los objetos arqueológicos de copal del Nevado de Toluca. En Junco, R. y Hernández, I. (Coords.), *Casa de los dioses, Nevado de Toluca: Arqueología y cosmovisión de una montaña sagrada*. INAH, UAEM. https://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/112173/Casa_de_los_dioses.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Regert, M. y Rolando, C. (2002). Identification of archaeological adhesives using direct inlet electron ionization mass spectrometry. *Analytical Chemistry*, 74(5), 965-975.
- Reyes, B. (2022). *Análisis de biomarcadores de copal mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas en piezas arqueológicas de centro de Veracruz* (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Reyes, M. J. (2014). *Las figurillas sonrientes: Un estudio diacrónico de su función* (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Ribechini, E., Modugno, F., Colombini, M. P. y Evershed, R. P. (2008). Gas chromatographic and mass spectrometric investigations of organic residues from Roman glass unguentaria. *Journal of Chromatography A*, 1183, 158-169.
- Riquelme, F., Bucio, L., Belio-Reyes, I. A. y Vega-Aviña, R. (2017). Copal. En Riquelme, F., Ruvalcaba, J. L. y Bucio, L. (Eds.), *Ámbar y copal de México*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Robinson, N., Evershed, R. P., Higgs, W. J., Jerman, K. y Eglinton, G. (1987). Proof of a pine wood origin for pitch from Tudor (Mary Rose) and Etruscan shipwrecks: application of analytical organic chemistry in archaeology. *Analyst*, 112(5), 637-644.
- Roffet-Salque, M., Dunne, J., Altoft, D. T., Casanova, E., Cramp, L. J. E., Smyth, J., Whelton, H. L. y Evershed, R. P. (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-Bahena, S., Garduño-Ramírez, M. L., Rodríguez-López, V. y Alvarez, L. (2016). Anti-inflammatory and antioxidative effects of six pentacyclic

REFERENCIAS

- triterpenes isolated from the Mexican copal resin of *Bursera copallifera*. *BCM Complementary and Alternative Medicine*, 16: 422.
- Rubinson, K. A. y Rubinson, J. F. (2001). *Análisis instrumental*. Prentice Hall.
- Ruiz, H. (2010). *Tratado de las supersticiones y costumbres gentílicas que hoy viven entre los indios naturales de esta Nueva España*. Linkgua Ediciones.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. CONABIO. https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf
- Rzedowski, J. (2015). Algunas reflexiones en torno al trabajo florístico en México. *Botanical Sciences*, 93(1), 1-2.
- Rzedowski, J. y Calderón, G. (1996). Burseraceae. *Flora de Veracruz*, 94, 1-37.
- Rzedowski, J., Medina, R. y Calderón, G. (2004). Las especies de *Bursera* (Burseraceae) en la cuenca superior del río Papaloapan (México). *Acta Botánica Mexicana*, 66, 23-151.
- Salinas, D. O., Arteaga, G. L., León, I., Dorado, O., Valladares, M. G. y Navarro, V. M. (2009). Antimicrobial activity of medicinal plants from the Huautla Sierra Biosphere Reserve in Morelos (Mexico). *Polibotánica*, 28, 213-225.
- Seetha, D. y Velraj, G. (2015). Spectroscopic and statistical approach of archaeological artifacts recently excavated from Tamilnadu, South India. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 149, 59-68.
- Shillito, L. M., Almond, M. J., Wicks, K., Marshall, L-J. R. y Matthews, W. (2009). The use of FT-IR as a screening technique for organic residue analysis of archaeological samples. *Spectrochimica Acta Part A*, 72(1), 120-125.
- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J. y Crouch, S. R. (2015). *Fundamentos de química analítica*. Cengage Learning.
- Smith, B. C. (1998). *Infrared spectral interpretation: a systematic approach*. CRC Press.
- Smith, R. M. (2003). Before the injection-modern methods of sample preparation for separation techniques. *Journal of Chromatography A*, 1000, 3-27.
- Sparkman, O. D., Penton, Z. E. y Kitson, F. G. (2011). *Gas chromatography and mass spectrometry: A practical guide*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-17039-3>

REFERENCIAS

- Stacey, R. J. (2009). Organic residues: origins, analysis and scope – an overview for the archaeological ceramicist. *The Old Potter's Almanack*, 14(1), 1-8.
- Stacey, R. J., Cartwright, C. R. y McEwan, C. (2006). Chemical characterization of ancient Mesoamerican 'copal' resins: preliminary results. *Archaeometry*, 48(2), 323-340.
- Stark, B. L. (2010). Nopiloa. En Vásquez, S., Bernard, H. N. y Ladrón, S. (Eds.), *La morada de nuestros ancestros. Alternativas para la conservación*. Gobierno del Estado de Veracruz-Consejo Veracruzano de Investigación Científica.
- Stark, B. L. (2022). *The archaeology of political organization: urbanism in Classic period Veracruz, Mexico*. The Cotsen Institute of Archaeology Press. <https://escholarship.org/uc/item/1hf2b69s>
- Stark, B. L. y Curet, L. A. (1994). The development of the Classic-Period Mixtequilla in South-Central Veracruz, Mexico. *Ancient Mesoamerica*, 5(2), 267-287.
- Stross, B. (1997). Mesoamerican Copal Resins. *U-MUT Maya*, 6, 177-186.
- Sumner, N. R., Guitart, C., Fuentes, G. y Readman, J. W. (2010). Inputs and distributions of synthetic musk fragrances in an estuarine and coastal environment; a case study. *Environmental Pollution*, 158(1), 215-222.
- Suzuki, S. y Umezawa, T. (2007). Biosynthesis of lignans and norlignans. *Journal of Wood Science*, 53, 273-284.
- Téllez, O., Reyes, M., Dávila, P., Gutiérrez, K., Téllez, O., Álvarez, R., González, A., Rosas, I., Ayala, M., Hernández, M., Murguía, M. y Guzmán, U. (2009). *Guía ecoturística. Las plantas del valle de Tehuacán-Cuicatlán*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Tenorio, M. D. y Méndez-Garrido, B. (2004). Arqueometría: la ciencia al servicio del arte. *Ciencia*, 55(2), 35-42.
- Thompson, J. M. (2018a). *Infrared spectroscopy*. Jenny Stanford Publishing. <https://doi.org/10.1201/9781351206037>
- Thompson, J. M. (2018b). *Mass spectrometry*. Jenny Stanford Publishing. <https://doi.org/10.1201/9781351207157>
- Tiwari, B. K. (2015). Ultrasound: A clean, green extraction technology. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 71, 100-109.
- Uriarte, M. T. (1986). Caritas sonrientes del centro de Veracruz. *Anales del Instituto de Investigaciones Estéticas*, 14(55), 27-30.

REFERENCIAS

- Velasco, R. (2014). *Los braseros de culto: Investigación a partir de pisos quemados en un sitio del clásico en el centro de Veracruz* (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Velasco, R. (2018). *Análisis de residuos químicos a través de pruebas sencillas (spot test) de braseros, sahumeros y candeleros resguardados en las bodegas del Museo de Antropología de Xalapa (MAX)*. Informe técnico parcial. Archivo Técnico de la Coordinación de Arqueología del Instituto Nacional de Antropología e Historia. Ciudad de México.
- Velázquez-Jiménez, R., Torres-Valencia, J. M., Cerda-García-Rojas, C. M., Hernández-Hernández, J. D., Román-Marín, L. U., Manríquez-Torres, J. J., Gómez-Hurtado, M. A., Valdez-Calderón, A., Motilva, V., García-Mauriño, S., Talero, E., Ávila, J. y Joseph-Nathan, P. (2011). Absolute configuration of podophyllotoxin related lignans from *Bursera fagaroides* using vibrational circular dichroism. *Phytochemistry*, 72(17), 2237-2243.
- Venkatachalapathy, R., Sridharan, T., Dhanapandian, S. y Manoharan, C. (2002). Determination of firing temperature of ancient potteries by means of infrared and Mossbauer studies. *Spectroscopy Letters*, 35(6), 769-779.
- Vieira, G. F. y Coelho, L. J. D. (2012). Archaeometry: a historical look at a developing science. *Revista CPC*, 13, 107-133.
- Wyllie, C. (2010). The mural paintings of El Zapotal, Veracruz, Mexico. *Ancient Mesoamerica*, 21(2), 209-227.
- Wypych, G. (Ed.). (2023). *Handbook of plasticizers*. ChemTec Publishing.
- Xu, Z., Xiong, X., Zhao, Y., Xiang, W. y Wu, C. (2020). Pollutants delivered every day: Phthalates in plastic express packaging bags and their leaching potential. *Journal of Hazardous Materials*, 384: 121282.

ESPECTROS DE INFRARROJO DE LAS MUESTRAS DE QUEMADORES DE COPAL

Espectros IR de muestras de Brasero1

Espectros IR de los polvos de Brasero1

Espectro IR de Brasero1P → p. 118

Espectro IR de Brasero1C → p. 119

Espectros IR de los extractos de Brasero1

Espectro IR de EB1P → p. 120

Espectro IR de EB1C → p. 121

Espectros IR de muestras de Brasero2

Espectros IR del polvo de Brasero2

Espectro IR de Brasero2G → p. 122

Espectros IR del extracto de Brasero2

Espectro IR de EB2G → p. 123

Espectros IR de muestras de Sahumador1

Espectros IR de los polvos de Sahumador1

Espectro IR de Sahumador1P → p. 124

Espectro IR de Sahumador1F → p. 125

Espectros IR de los extractos de Sahumador1

Espectro IR de ES1P → p. 126

Espectro IR de ES1F → p. 127

ANEXO A ESPECTROS DE INFRARROJO DE LAS MUESTRAS DE QUEMADORES DE
COPAL

Espectros IR de muestras de Brasero3

Espectros IR de los polvos de Brasero3

Espectro IR de Brasero3F → p. 128

Espectro IR de Brasero3AFE → p. 129

Espectros IR de los extractos de Brasero3

Espectro IR de EB3F → p. 130

Espectro IR de EB3AFE → p. 131

ANEXO A ESPECTROS DE INFRARROJO DE LAS MUESTRAS DE QUEMADORES DE COPAL

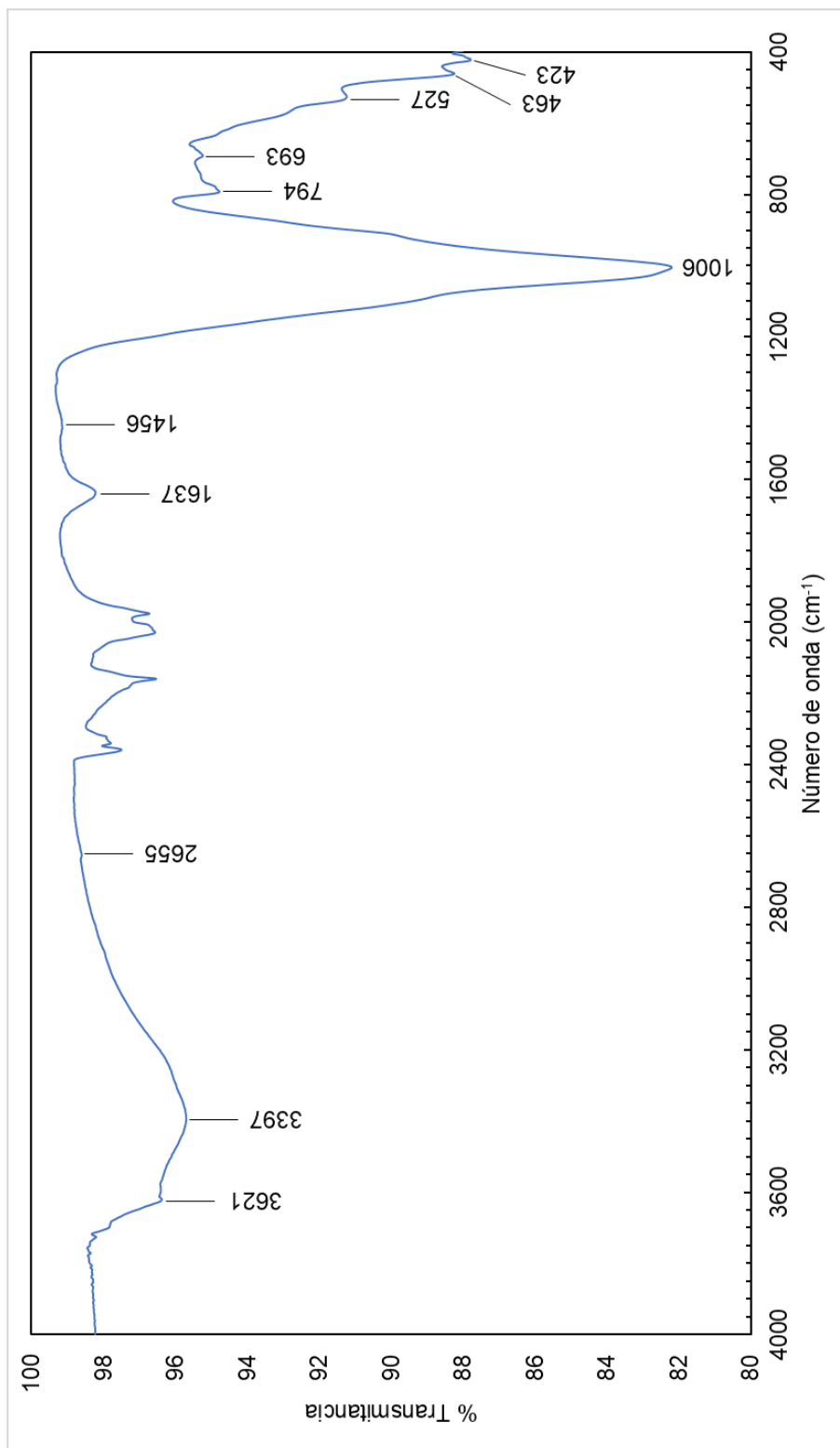


Fig. A.1. Espectro de infrarrojo del polvo Braseiro1P.

ANEXO A ESPECTROS DE INFRARROJO DE LAS MUESTRAS DE QUEMADORES DE COPAL

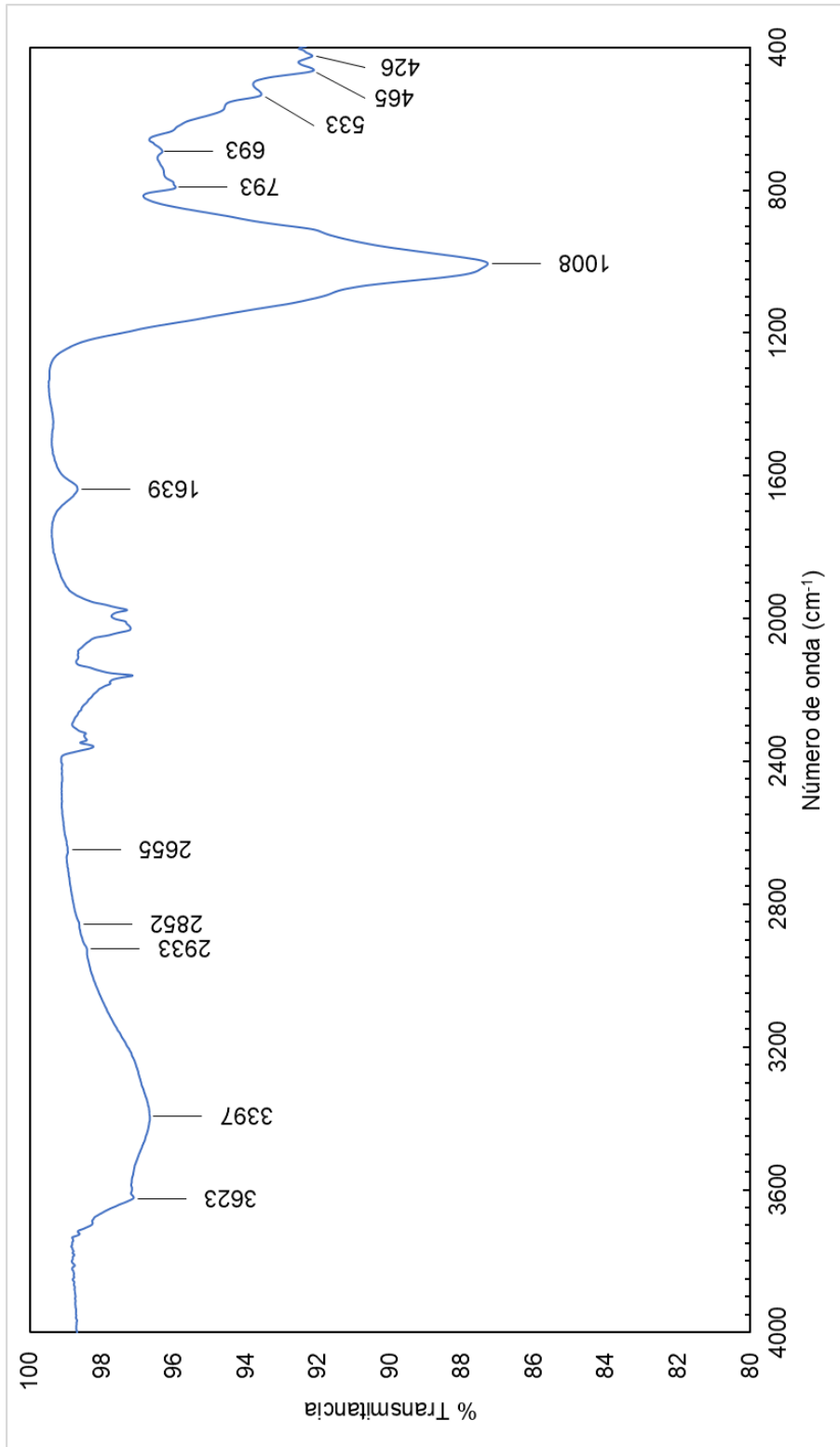


Fig. A.2. Espectro de infrarrojo del polvo Braseo1C.

ANEXO A ESPECTROS DE INFRARROJO DE LAS MUESTRAS DE QUEMADORES DE COPAL

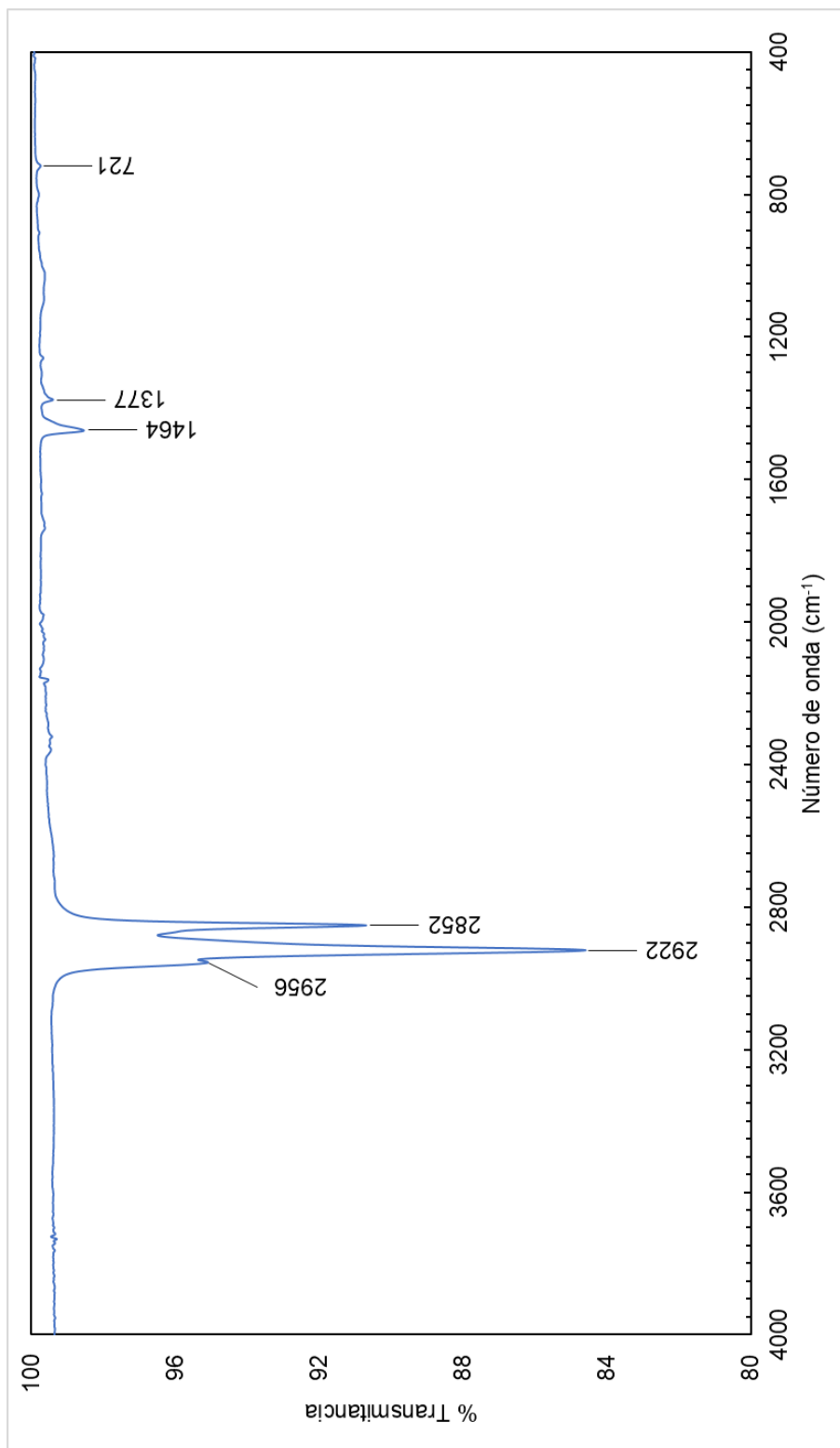


Fig. A.3. Espectro de infrarrojo del extracto EB1P.

ANEXO A ESPECTROS DE INFRARROJO DE LAS MUESTRAS DE QUEMADORES DE COPAL

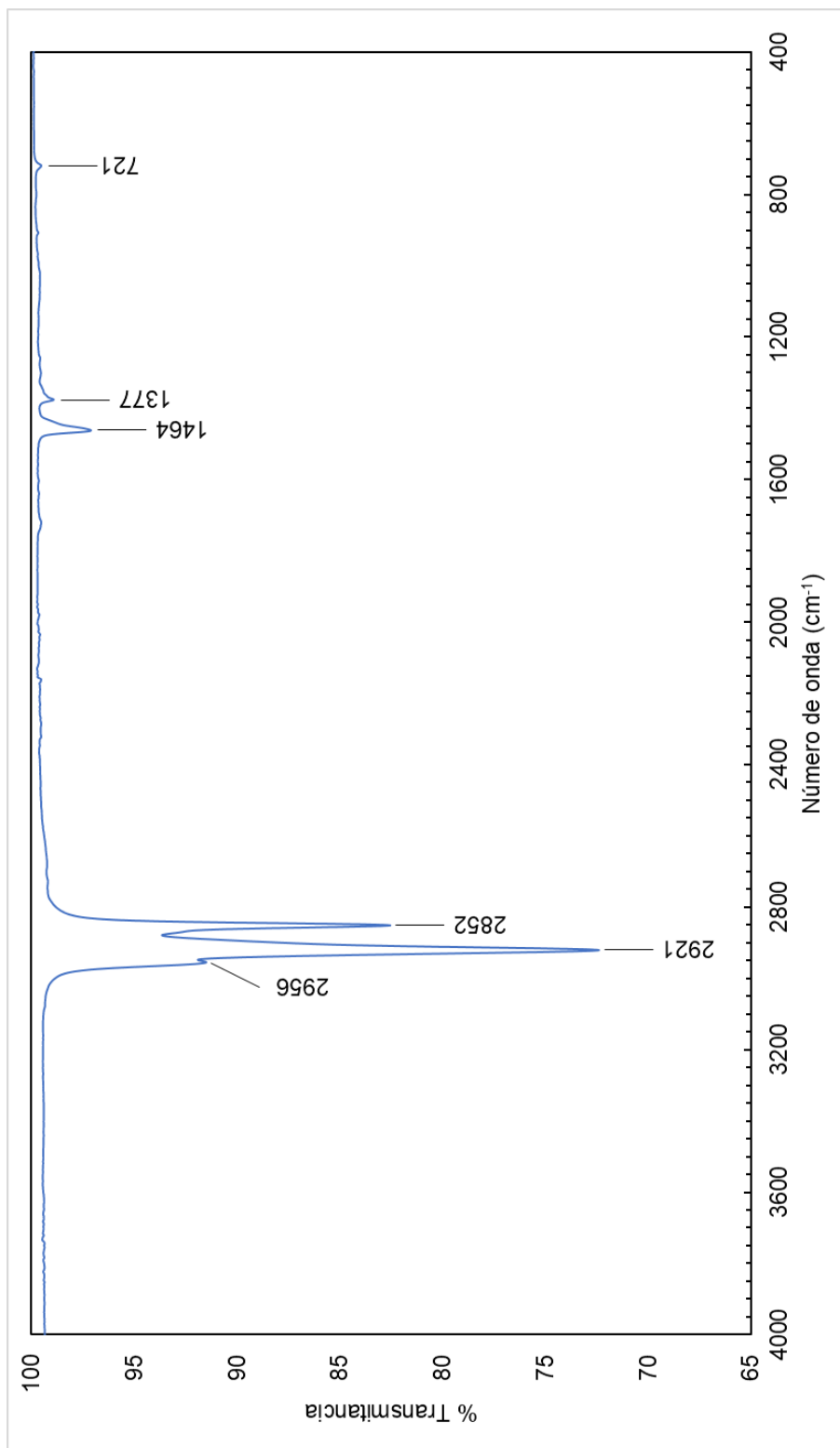


Fig. A.4. Espectro de infrarrojo del extracto EB1C.

ANEXO A ESPECTROS DE INFRARROJO DE LAS MUESTRAS DE QUEMADORES DE COPAL

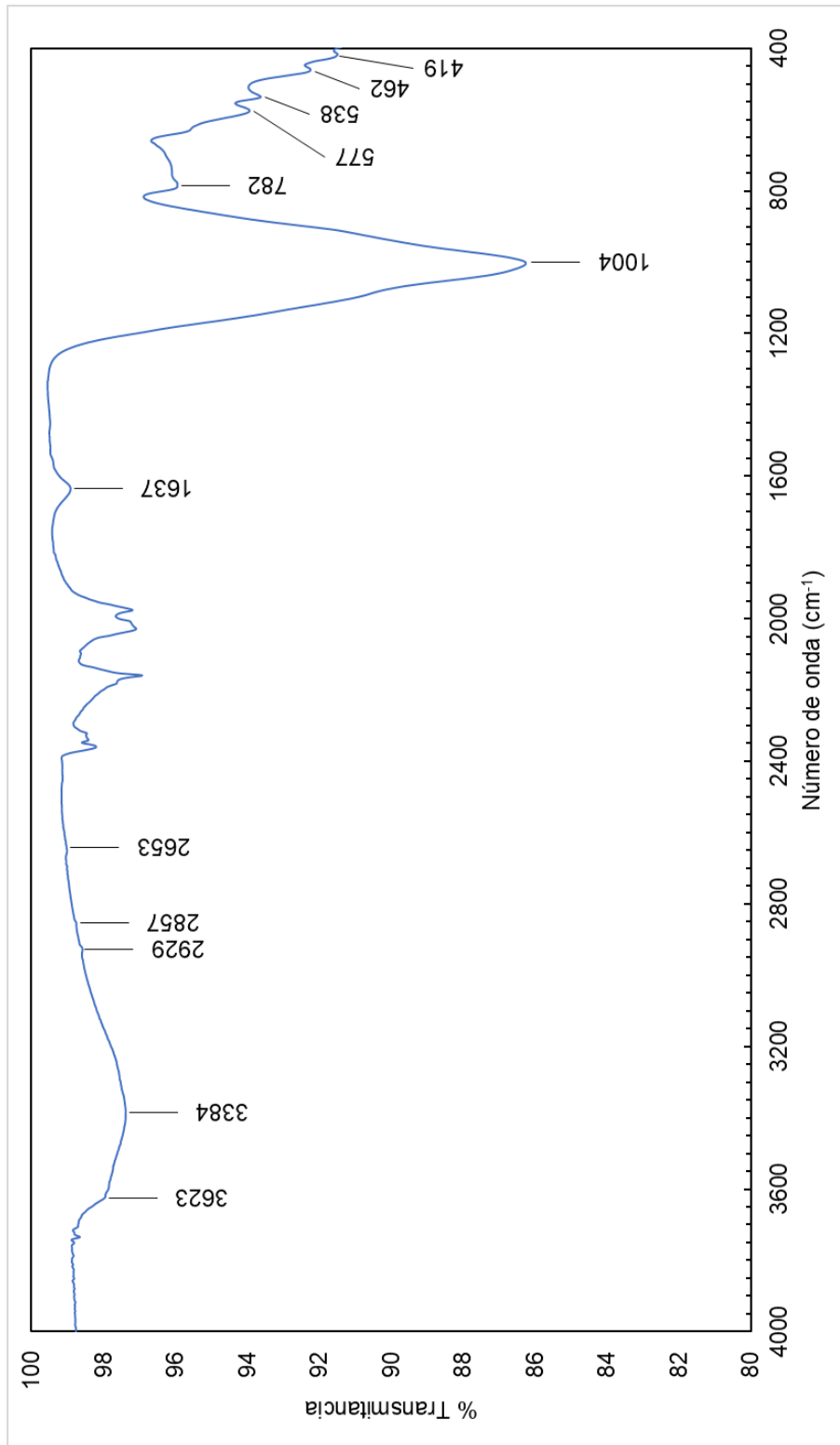


Fig. A.5. Espectro de infrarrojo del polvo Brasero2G.

ANEXO A ESPECTROS DE INFRARROJO DE LAS MUESTRAS DE QUEMADORES DE COPAL

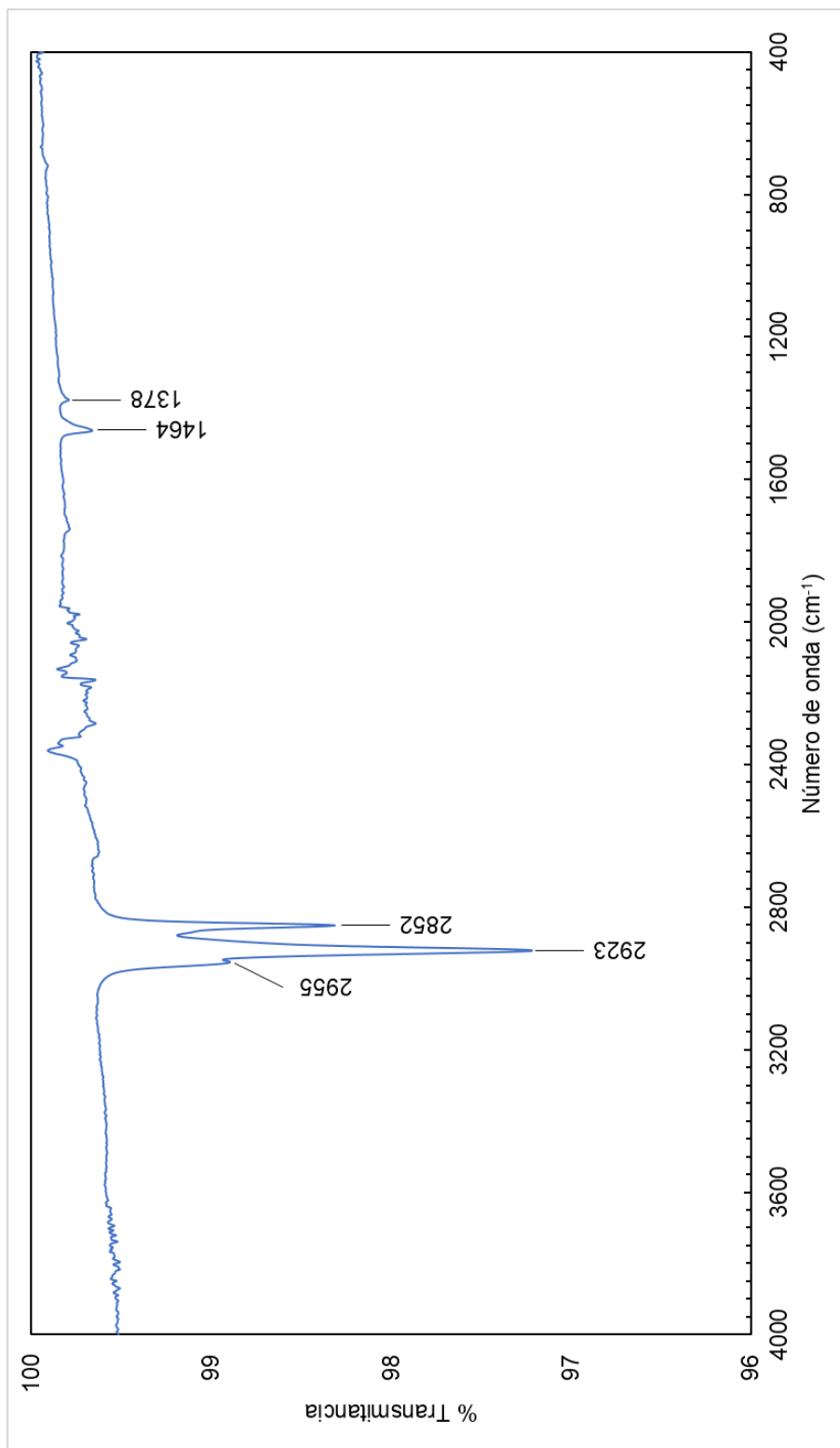


Fig. A.6. Espectro de infrarrojo del extracto EB2G.

ANEXO A ESPECTROS DE INFRARROJO DE LAS MUESTRAS DE QUEMADORES DE COPAL

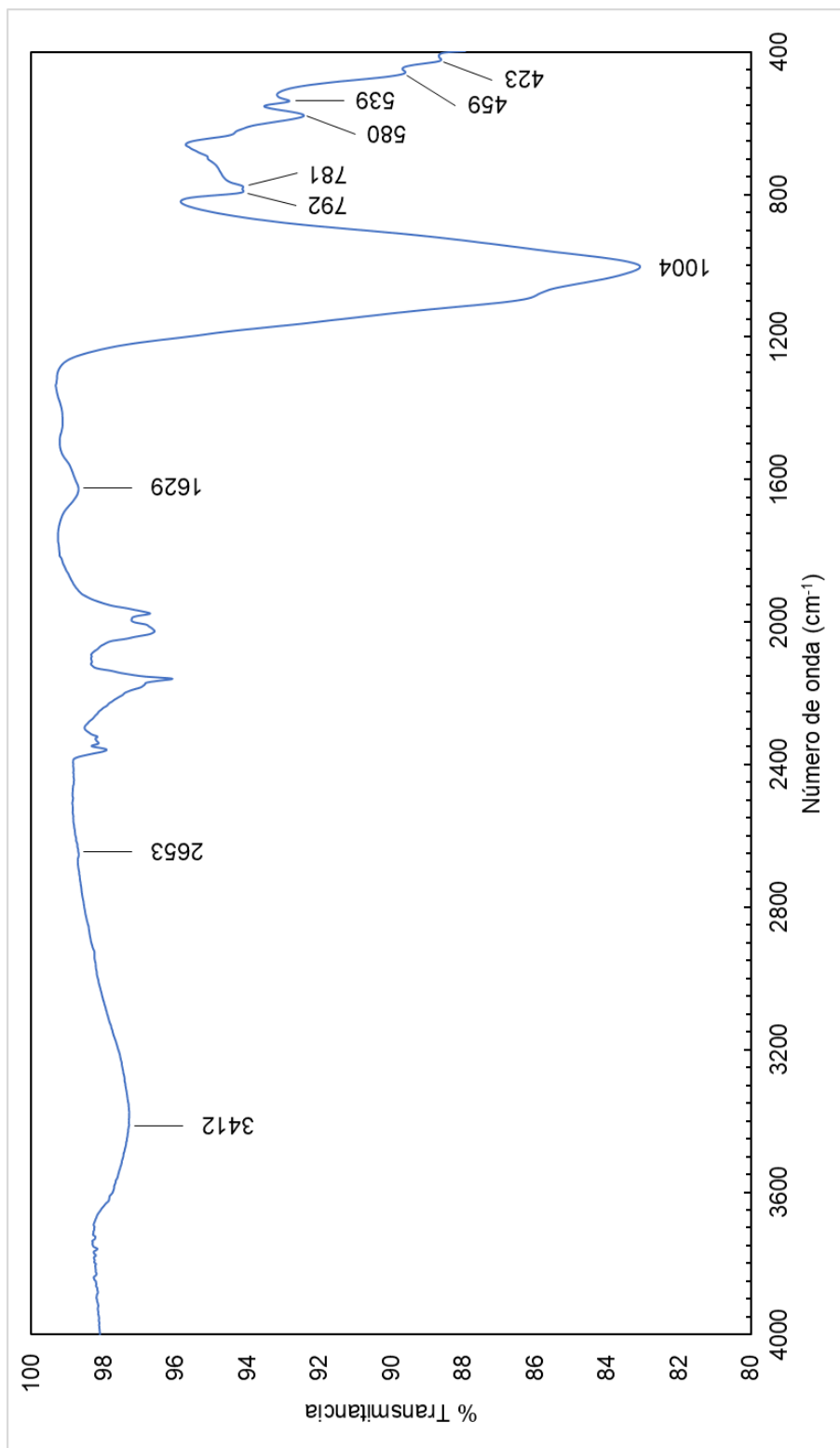


Fig. A.7. Espectro de infrarrojo del polvo Sahumador1P.

ANEXO A ESPECTROS DE INFRARROJO DE LAS MUESTRAS DE QUEMADORES DE COPAL

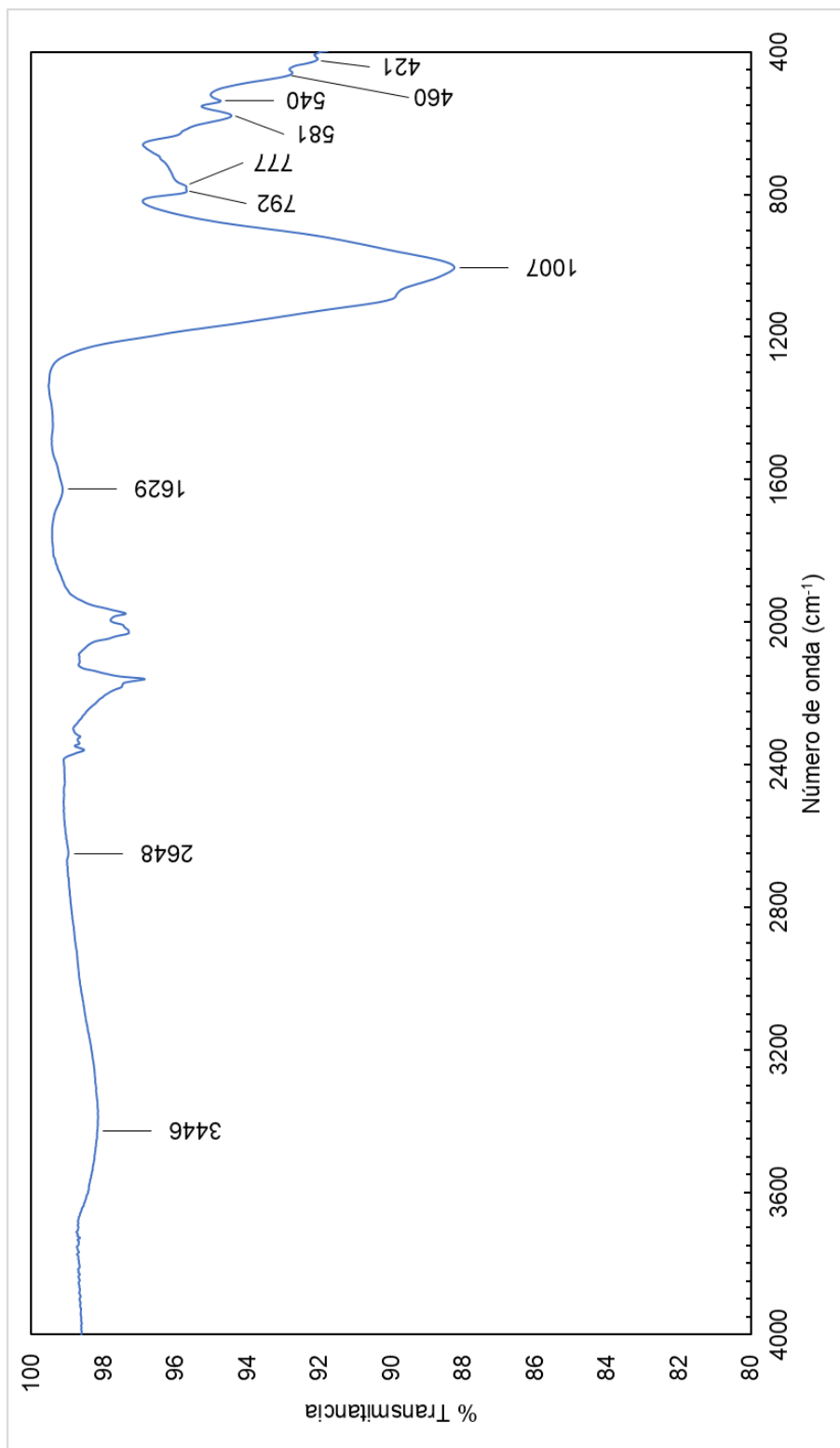


Fig. A.8. Espectro de infrarrojo del polvo Sahumador1F.

ANEXO A ESPECTROS DE INFRARROJO DE LAS MUESTRAS DE QUEMADORES DE COPAL

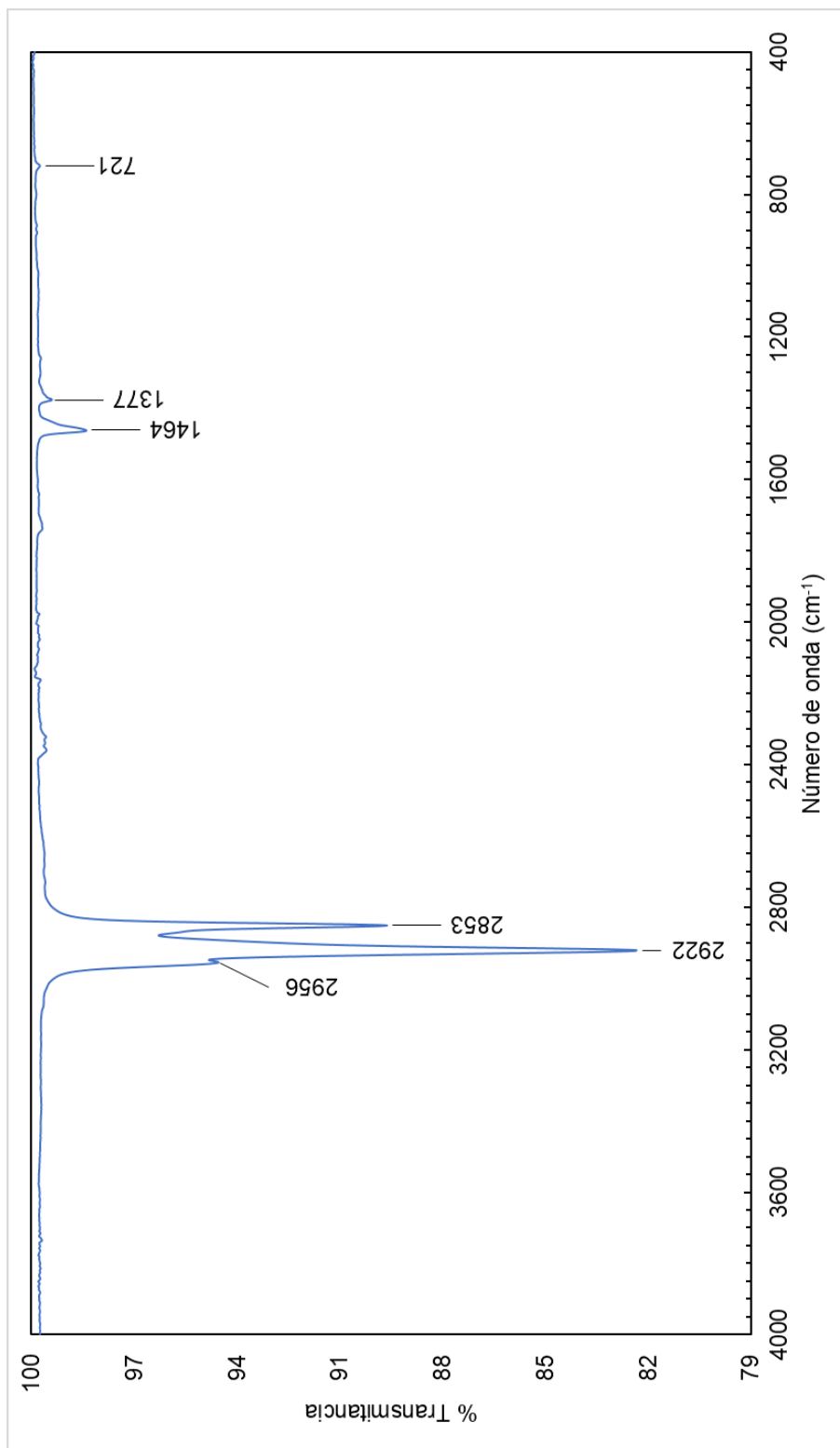


Fig. A.9. Espectro de infrarrojo del extracto ES1P.

ANEXO A ESPECTROS DE INFRARROJO DE LAS MUESTRAS DE QUEMADORES DE COPAL

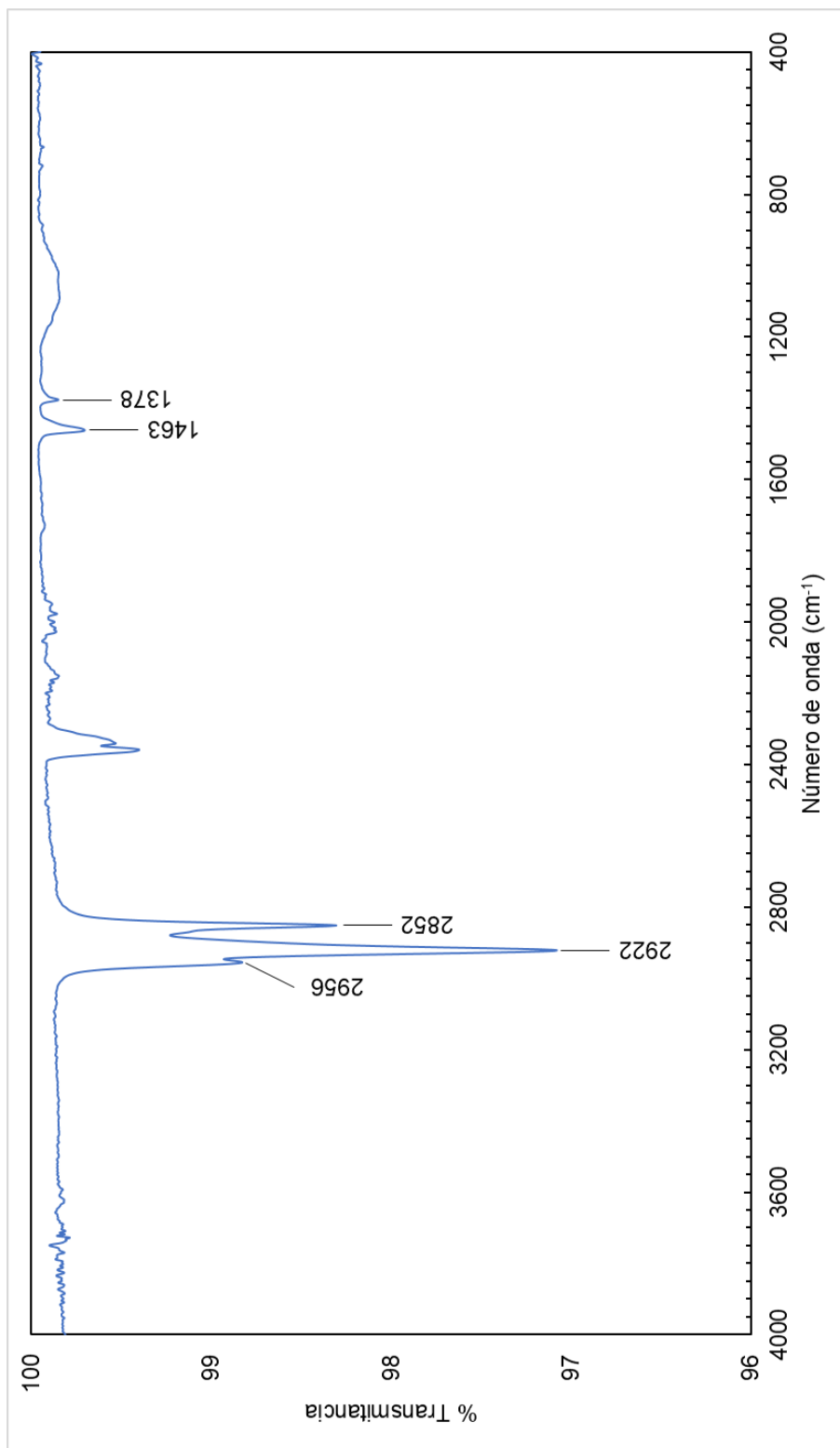


Fig. A.10. Espectro de infrarrojo del extracto ES1F.

ANEXO A ESPECTROS DE INFRARROJO DE LAS MUESTRAS DE QUEMADORES DE COPAL

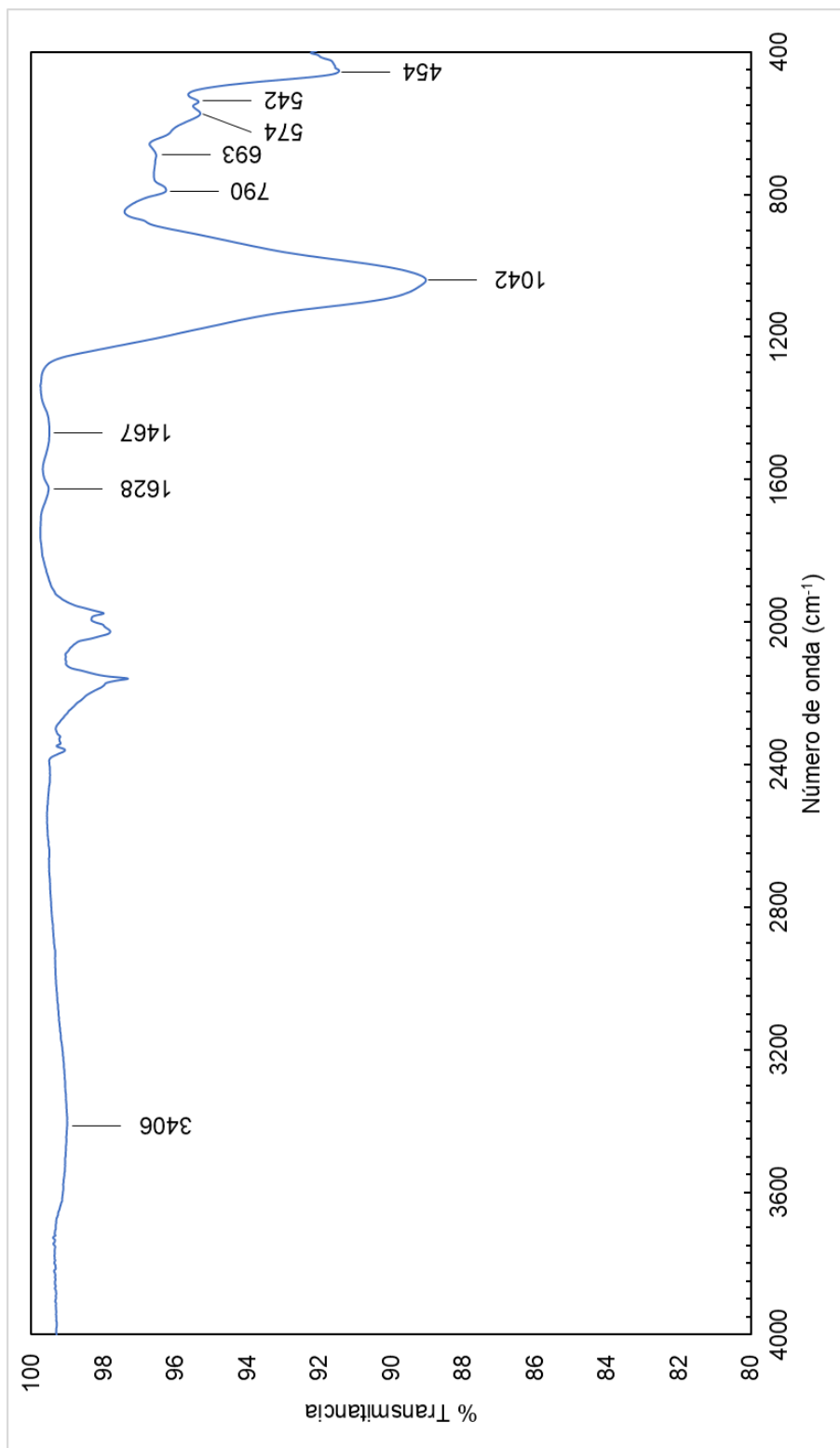


Fig. A.11. Espectro de infrarrojo del polvo Braseiro3F.

ANEXO A ESPECTROS DE INFRARROJO DE LAS MUESTRAS DE QUEMADORES DE COPAL

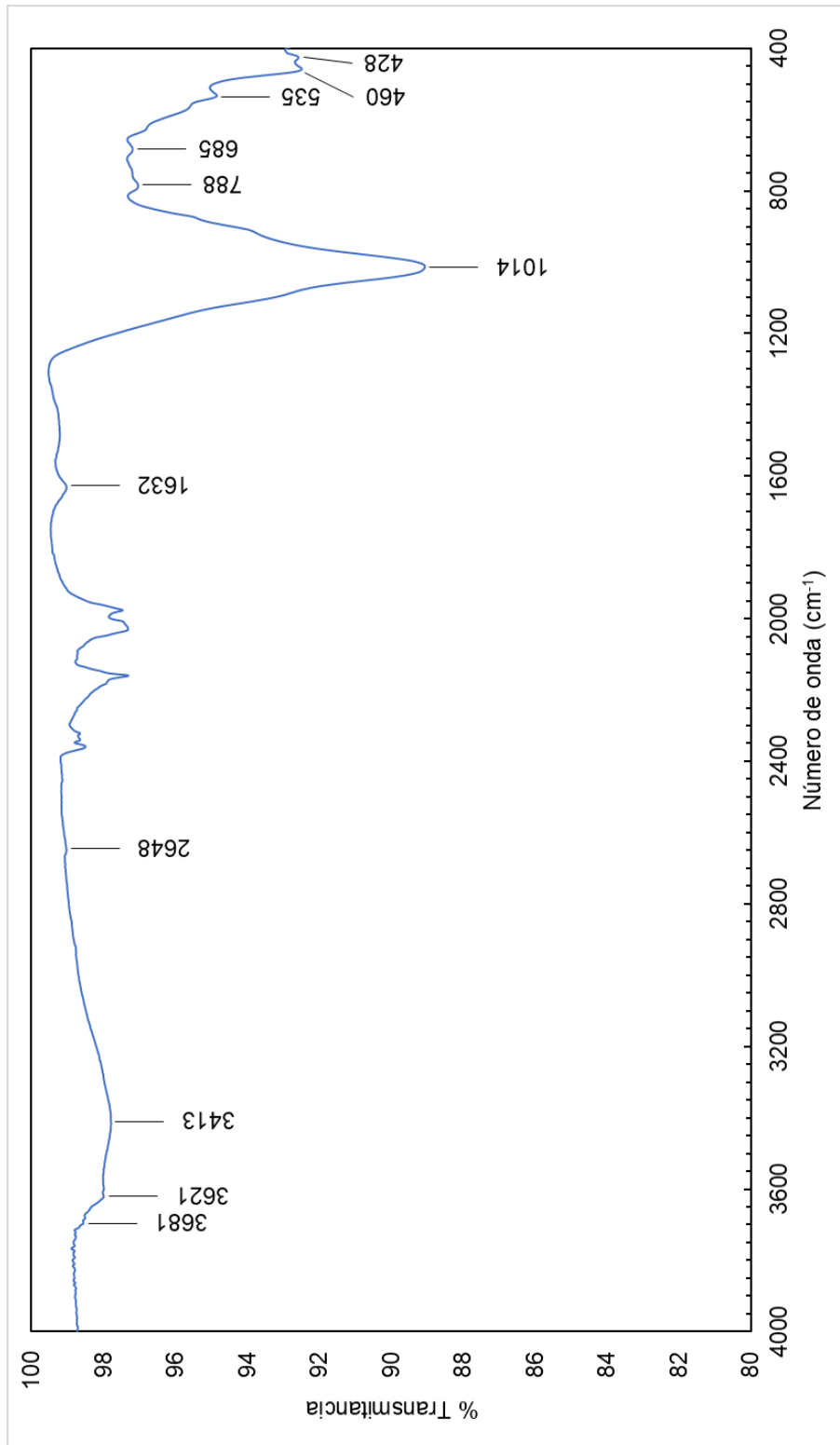


Fig. A.12. Espectro de infrarrojo del polvo Brasero3AFE.

ANEXO A ESPECTROS DE INFRARROJO DE LAS MUESTRAS DE QUEMADORES DE COPAL

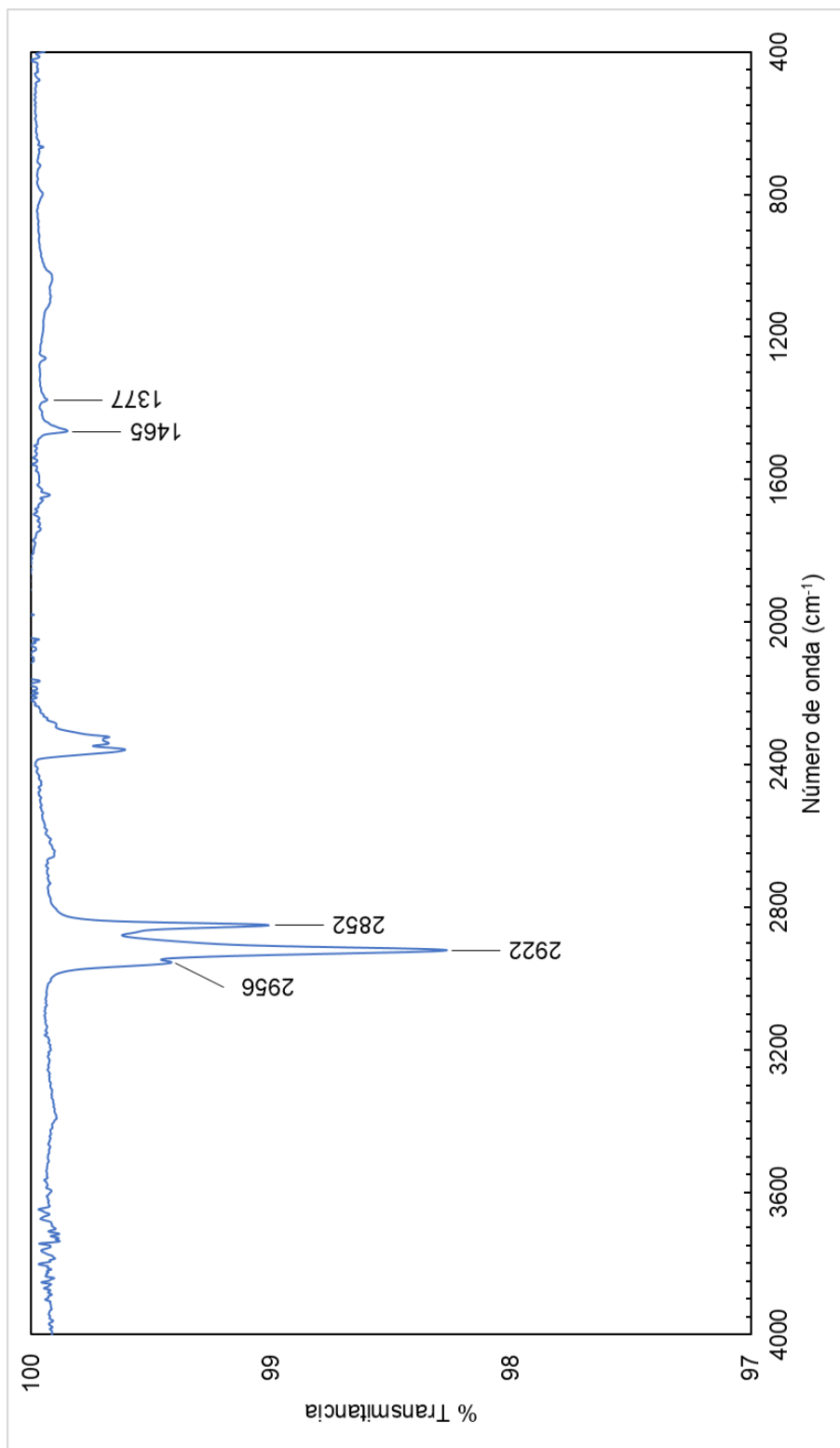


Fig. A.13. Espectro de infrarrojo del extracto EB3F.

ANEXO A ESPECTROS DE INFRARROJO DE LAS MUESTRAS DE QUEMADORES DE COPAL

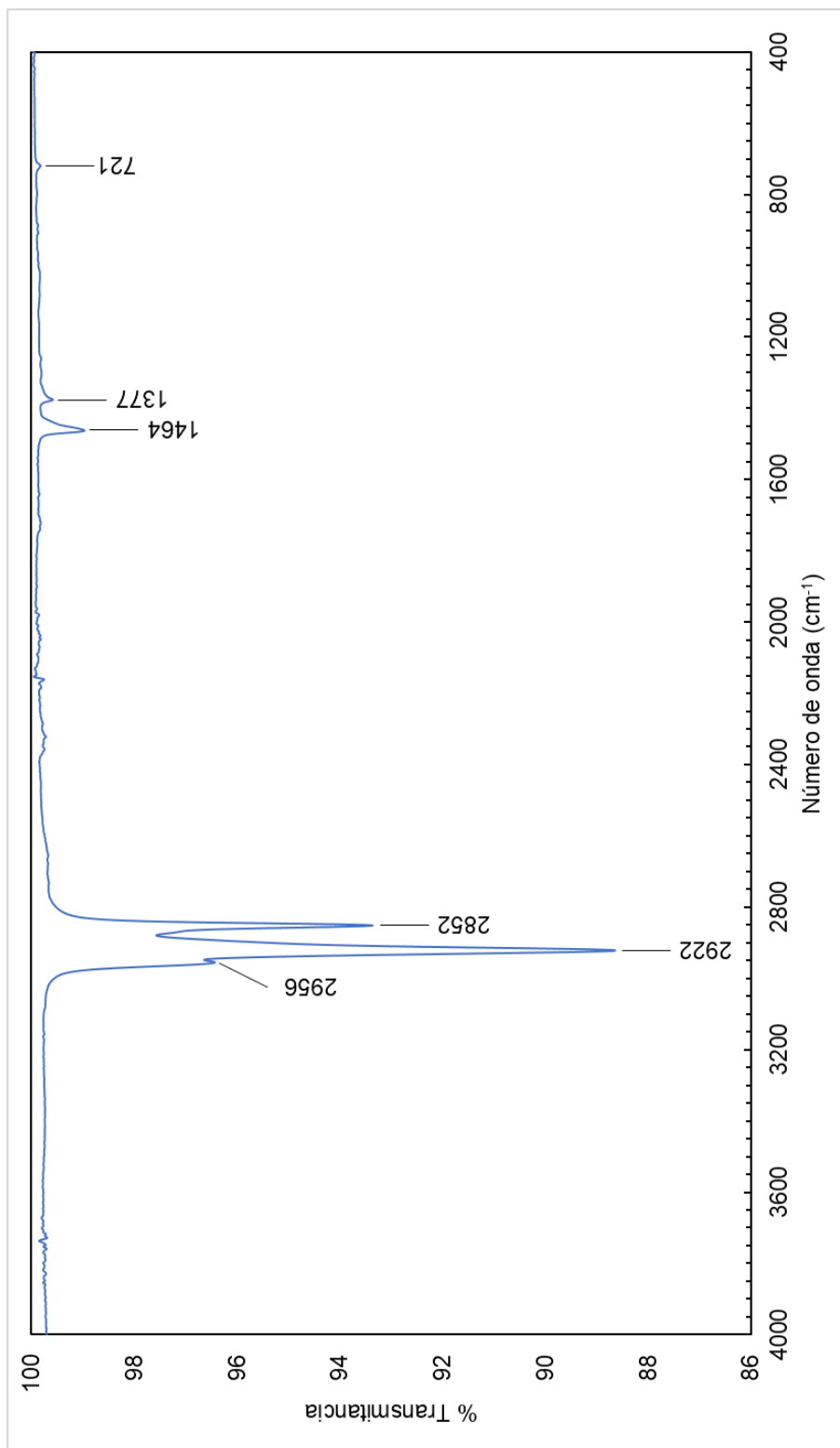


Fig. A.14. Espectro de infrarrojo del extracto EB3AFE.

CROMATOGRAMAS DE LOS EXTRACTOS Y COMPUESTOS IDENTIFICADOS

Resultados de CG-EM de los extractos de Brasero1

- Cromatograma de EB1P → p. 133
- Compuestos identificados en EB1P → p. 134
- Cromatograma de EB1C → p. 136
- Compuestos identificados en EB1C → p. 137

Resultados de CG-EM del extracto de Brasero2

- Cromatograma de EB2G → p. 139
- Compuestos identificados en EB2G → p. 140

Resultados de CG-EM de los extractos de Sahumador1

- Cromatograma de ES1P → p. 141
- Compuestos identificados en ES1P → p. 142
- Cromatograma de ES1F → p. 145
- Compuestos identificados en ES1F → p. 146

Resultados de CG-EM de los extractos de Brasero3

- Cromatograma de EB3F → p. 148
- Compuestos identificados en EB3F → p. 149
- Cromatograma de EB3AFE → p. 151
- Compuestos identificados en EB3AFE → p. 152

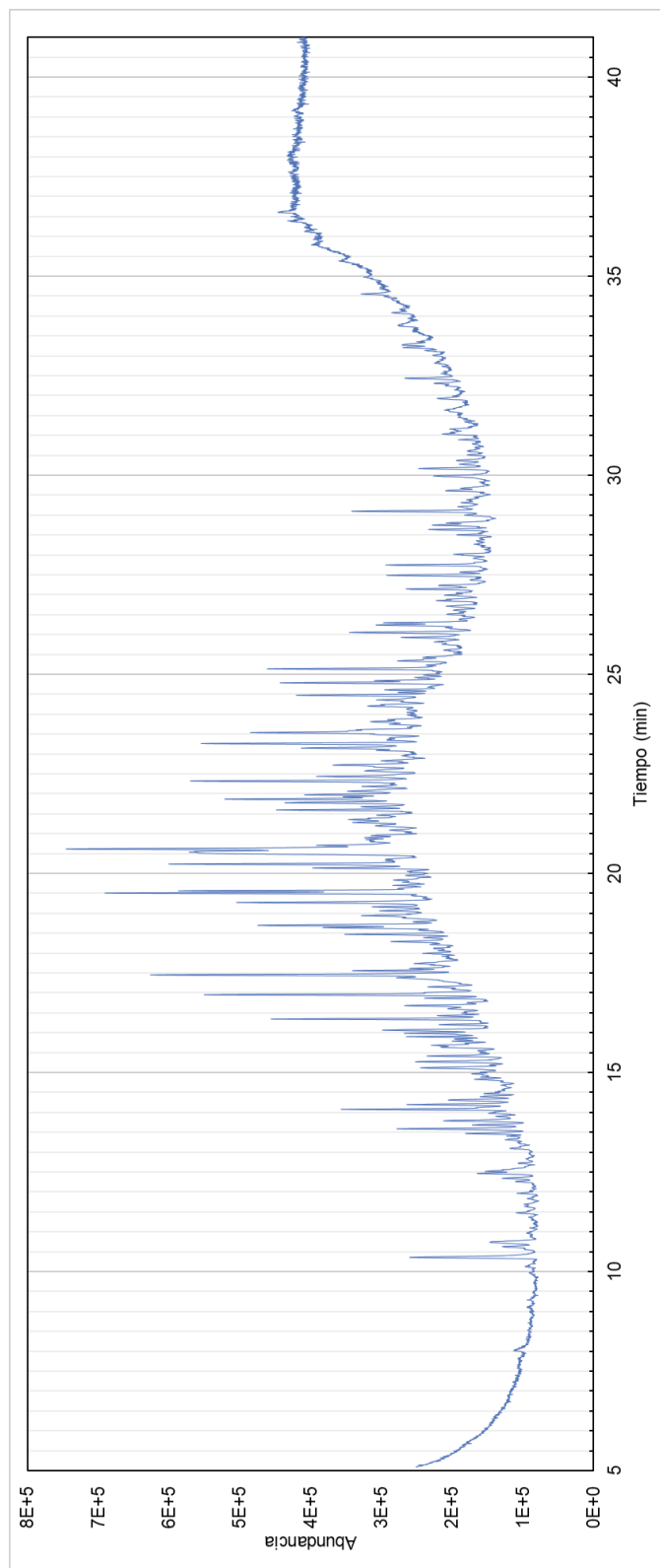


Fig. B.1. *Cromatograma del extracto EB1P.*

Tabla B.1. *Compuestos identificados en EB1P.*

t_R (min)	Compuesto	MF
10.1316	Decane, 3,8-dimethyl-	85.3
10.3611	2,5-Cyclohexadiene-1,4-dione, 2,6-bis(1,1-dimethylethyl)-	96.1
10.6286	1-Pentadecene	94.3
11.4747	Hexadecane	87.8
11.6329	Undecane, 4,4-dimethyl-	83.8
12.4653	Hexadecane	93.6
12.5188	2,2,4-Trimethyl-1,3-pentanediol diisobutyrate (<i>TXIB</i>)	89.7
13.4678	1-Hexadecanol	90.8
13.5884	Octane, 1,1'-oxybis-	93.3
13.8665	Sulfurous acid, 2-ethylhexyl hexyl ester	81.4
14.0755	1-Nonadecene	96.7
14.1961	Heptadecane	91.1
14.3051	Pentadecane, 2,6,10,14-tetramethyl- (<i>Pristano</i>)	86.6
14.4682	Benzoic acid, 2-ethylhexyl ester	89.6
14.5094	1,1'-Biphenyl, 2,2',5,5'-tetramethyl-	83.6
14.674	Phenol, 4-(1-phenylethyl)-	80.4
15.109	Hexadecane, 1-iodo-	80.3
15.127	Octanal, 2-(phenylmethylene)-	82.6
15.2665	Cyclohexane, undecyl-	88.1
15.4138	Heptadecane, 3-methyl-	87.8
15.7856	1-Hexadecanol	82.5
15.846	Oxalic acid, di(cyclohexylmethyl) ester	83.2
15.8995	Octadecane	91.8
15.9885	5,5-Diethylpentadecane	91.8
16.0641	Hexadecane, 2,6,10,14-tetramethyl- (<i>Fitano</i>)	85.3
16.204	Pentadecanal-	90
16.3433	Isopropyl myristate	95.5
16.678	2-Pentadecanone, 6,10,14-trimethyl-	86.8
16.8681	3,3-Diethylpentadecane	87.6
17.1142	Phthalic acid, hept-3-yl isobutyl ester	89.1
17.15	Tonalid	80.4
17.4525	Nonadecyl pentafluoropropionate	95.7
17.5582	Nonadecane	90.6
18.2884	5-Butyl-5-ethylpentadecane	84.6
18.47	3-Ethyl-3-methylheptadecane	88.8
18.6385	Dibutyl phthalate (DnBP)	92.4
18.6904	n-Tridecylcyclohexane	86.2
19.0621	Pentadecafluorooctanoic acid, heptadecyl ester	83.6
19.2699	5,5-Diethylheptadecane	86.1
19.5064	Octadecanal	97.1
19.5614	Isopropyl palmitate	91.3
20.1342	3,3-Diethylheptadecane	85.6
20.2334	1-Eicosanol	89.4
20.548	1-Hexadecanol	90.2
20.6133	1-Nonadecene	93.7
21.593	3-Ethyl-3-methylnonadecane	87
21.7749	Heneicosane, 3-methyl-	91.2
21.8656	n-Pentadecylcyclohexane	91.7

Tabla B.1. *Compuestos identificados en EB1P.* (continuación)

t_R (min)	Compuesto	MF
22.0664	p,p'-DDE	83.7
22.1846	Sulfurous acid, 2-ethylhexyl hexyl ester	81.8
22.4346	Sulfurous acid, cyclohexylmethyl octadecyl ester	82.7
22.5723	2-Isopropyl-10-methylphenanthrene	88.2
23.1524	3,3,13,13-Tetraethylpentadecane	84.1
23.2599	1-Tricosanol	89.1
23.5354	9-Tricosene, (Z)-	90
24.3634	8-Isopropyl-1,3-dimethylphenanthrene	84.4
24.611	2-Methyltetracosane	84.4
24.7864	n-Heptadecylcyclohexane	91.8
24.9797	Hexane, 3,3-dimethyl-	87.8
25.1357	3-Methyltetracosane	83.6
25.3373	Cyclohexane, 1-isopropyl-1-methyl-	88
25.93	3-Methyltetracosane	81.5
26.0519	Methyl tetracosyl ether	85.6
26.2377	1-Pentacosanol	82.7
26.2934	Tetracosane, 1-iodo-	83.1
26.9841	Phthalic acid, di(6-methylhept-2-yl) ester	85.7
27.1418	3-Methylpentacosane	83
27.4834	Cyclohexane, nonadecyl-	87.6
27.5669	Dodecane, 1-iodo-	82.7
27.7471	3-Methylhexacosane	80.8
28.0172	1,1'-Bicycloheptyl	86.1
28.6361	9-Hexacosene	85.4
28.7463	Behenic alcohol	81.1
28.7466	Carbonic acid, decyl octadecyl ester	82.2
29.6698	Sulfurous acid, di(2-ethylhexyl) ester	81.5
29.9799	Cyclohexane, nonadecyl-	87.2
30.1688	3-Methyloctacosane	81.7
30.5048	1H-Imidazol, 1-methyl-2-amino-	81.2
32.3122	Cyclohexane, octadecyl-	85.8
32.4309	3-Methyltriacontane	81.8
33.2106	12-Oleanen-3-yl acetate, (3.alpha.)- (<i>Acetato de β-amirina</i>)	63.4
33.2709	Carbonic acid, decyl tetradecyl ester	80.6

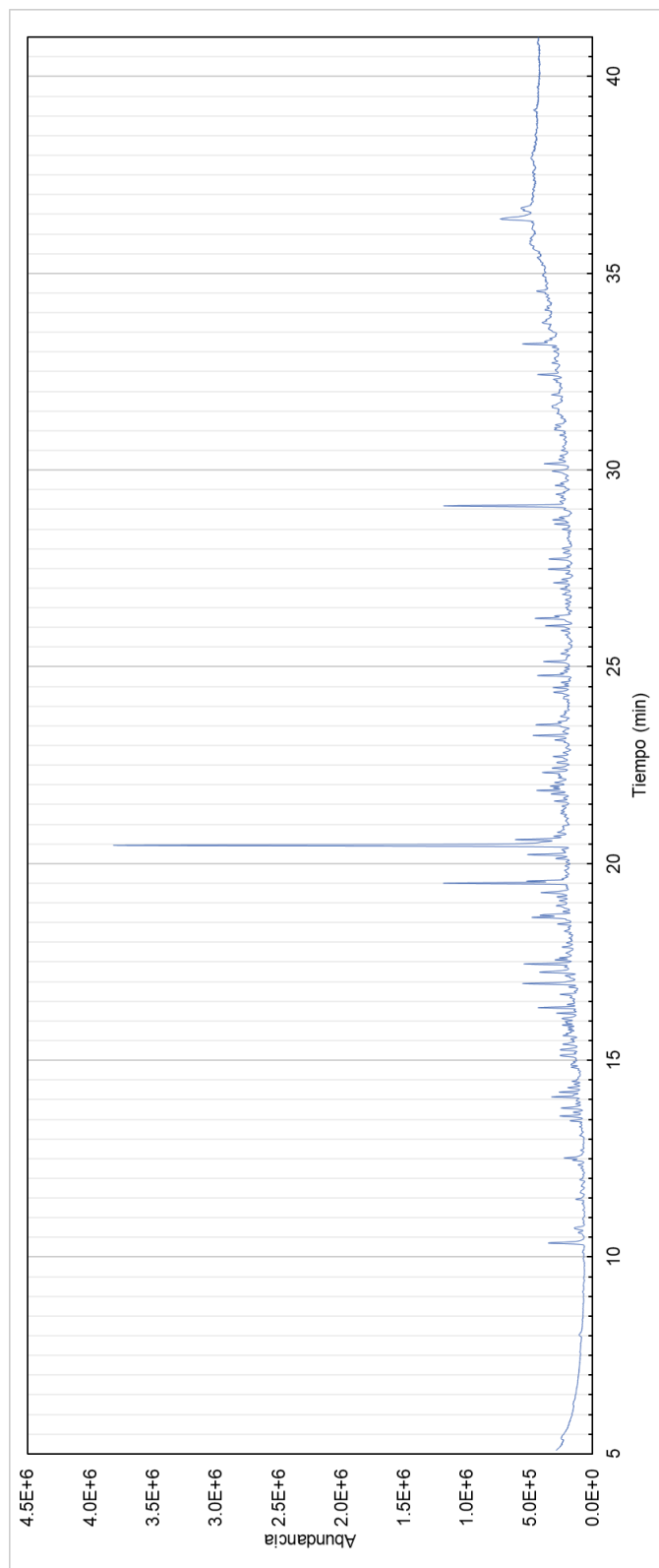


Fig. B.2. *Cromatograma del extracto EB1C.*

Tabla B.2. *Compuestos identificados en EB1C.*

t_R (min)	Compuesto	MF
10.1323	Decane, 3,8-dimethyl-	85.9
10.3609	2,5-Cyclohexadiene-1,4-dione, 2,6-bis(1,1-dimethylethyl)-	94.4
10.6251	9-Eicosene, (E)-	92.1
11.4738	Hexadecane	83.3
11.64	Hexadecane	80.5
11.6935	n-Nonylcyclohexane	81.5
11.8015	Hexadecane	81
12.2	3-Ethyl-3-methylheptane	80.3
12.4649	Hexadecane	86.7
12.5209	2,2,4-Trimethyl-1,3-pentanediol diisobutyrate (<i>TXIB</i>)	94.2
12.7147	Bicyclo[4.1.0]heptane, 7-pentyl-	82.8
13.1439	Benzophenone	88.4
13.4647	1-Hexadecanol	94.4
13.586	Octane, 1,1'-oxybis-	94.2
13.9725	Naphthalene, 1,6-dimethyl-4-(1-methylethyl)- (<i>Cadaleno</i>)	82.9
14.0724	1-Nonadecene	95.8
14.1939	Heptadecane	85.2
14.3986	Heneicosane	80.2
14.509	1,1'-Biphenyl, 2,2',5,5'-tetramethyl-	86.5
15.1254	Octanal, 2-(phenylmethylene)-	84.5
15.2635	Cyclohexane, undecyl-	85.1
15.411	Heptadecane, 3-methyl-	84.2
15.7836	1-Octadecanol	81.3
15.8974	Octadecane	86.2
15.9859	5,5-Diethylpentadecane	84.5
16.1991	Hexadecanal	94.4
16.3402	Isopropyl myristate	93.9
16.5223	3-Methylbenzoic acid, 2-methylbutyl ester	80.1
16.6765	2-Pentadecanone, 6,10,14-trimethyl-	86.5
17.1118	Phthalic acid, 6-ethyl-3-octyl butyl ester	88.1
17.152	Tonalid	85.2
17.2411	1-Hexadecanol	97.2
17.4486	1-Nonadecene	95.2
17.5553	Nonadecane	90.5
17.8797	Pentadecanal-	89.6
17.907	Galaxolide 2	80.9
18.4669	3-Ethyl-3-methylheptadecane	89.2
18.6335	Dibutyl phthalate (<i>DnBP</i>)	96.3
18.6858	n-Tridecylcyclohexane	87.3
19.0575	Pentadecafluorooctanoic acid, heptadecyl ester	82.8
19.5022	Octadecanal	98.1
19.5582	Isopropyl palmitate	85.9
20.024	9,10-Dihydro-9,10-dimethyl-9,10-ethanoanthracene-11,12-dicarboxylic acid, dimethyl ester	81.7
20.1296	3,3-Diethylheptadecane	84.7
20.229	n-Nonadecanol-1	86.1
20.4634	1-Octadecanol	97.8
20.6097	1-Nonadecene	95

Tabla B.2. *Compuestos identificados en EB1C.* (continuación)

t_R (min)	Compuesto	MF
20.6989	Dodecane, 1-iodo-	80.6
21.5908	3-Ethyl-3-methylnonadecane	86.1
21.7706	Heneicosane, 3-methyl-	88.3
21.8595	n-Pentadecylcyclohexane	87.6
22.0567	p,p'-DDE	85.9
22.1798	Sulfurous acid, 2-ethylhexyl hexyl ester	80.3
22.2342	Benzoic acid, 2-methylpropyl ester	80.1
22.568	2-Isopropyl-10-methylphenanthrene	91.8
23.2561	1-Tricosanol	91.3
23.5283	9-Tricosene, (Z)-	93.6
24.3475	Methyl dehydroabietate	85.8
24.3633	8-Isopropyl-1,3-dimethylphenanthrene	86.3
24.782	n-Heptadecylcyclohexane	86.5
24.9778	Butanoic acid, 2-methyl-, 1,2-dimethylpropyl ester	84.9
25.1334	3-Methyltetracosane	81.9
25.3346	Cyclohexane, 1-isopropyl-1-methyl-	84.2
26.0449	Methyl tetracosyl ether	89.3
26.9762	Phthalic acid, di(2-propylpentyl) ester	89.2
27.1363	3-Methylpentacosane	83.1
27.4779	Cyclohexane, nonadecyl-	90.1
27.7386	3-Methylhexacosane	82.8
28.0139	1,1'-Bicycloheptyl	80.2
28.6269	Hexacosyl methyl ether	83.1
28.7357	1-Nonadecene	86.1
29.385	1,4-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-ethylhexyl) ester (<i>DEHT</i>)	84.9
30.1608	3-Methyloctacosane	83.2
30.4939	Cyclohexane, 1-isopropyl-1-methyl-	83.9
31.0219	Methylamine, N-cyclopentylidene-	80.7
31.9131	Sulfurous acid, hexyl nonyl ester	81.5
32.3027	Cyclohexane, octadecyl-	83.1
32.4238	3-Methyltriacontane	82.6
33.2037	Lup-20(29)-en-3-ol, acetate, (3.beta.)- (<i>Acetato de lupeol</i>)	80.3
34.5505	Silane, dimethyl(4-methoxyphenoxy)heptadecyloxy-	80.2
36.3727	.beta.-Amyrone	80.3
36.6619	.alpha.-Amyrin	76.7

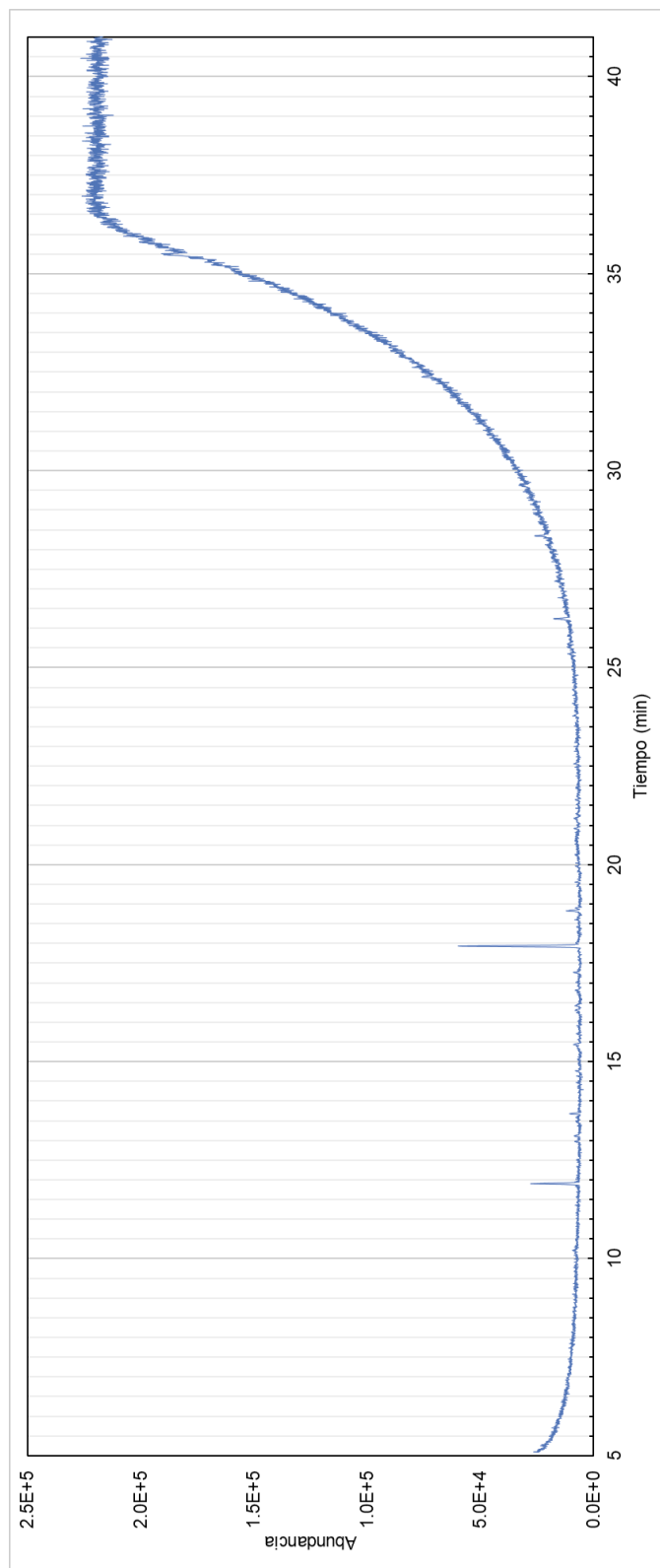


Fig. B.3. *Cromatograma del extracto EB2G.*

Tabla B.3. *Compuestos identificados en EB2G.*

t_R (min)	Compuesto	MF
12.245	anti-2-Acetoxyacetaldoxime	84.7
13.6853	Urea, 2-propenyl-	84.5
16.4285	Phthalic acid, cyclobutyl isobutyl ester	81.7
17.9388	Dibutyl phthalate (<i>DnBP</i>)	93
20.929	Oxalic acid, allyl isobutyl ester	81.8
24.3063	anti-2-Acetoxyacetaldoxime	83.6
26.248	Phthalic acid, di(2-propylpentyl) ester	82.1
27.2812	Formic acid, ethenyl ester	82.8

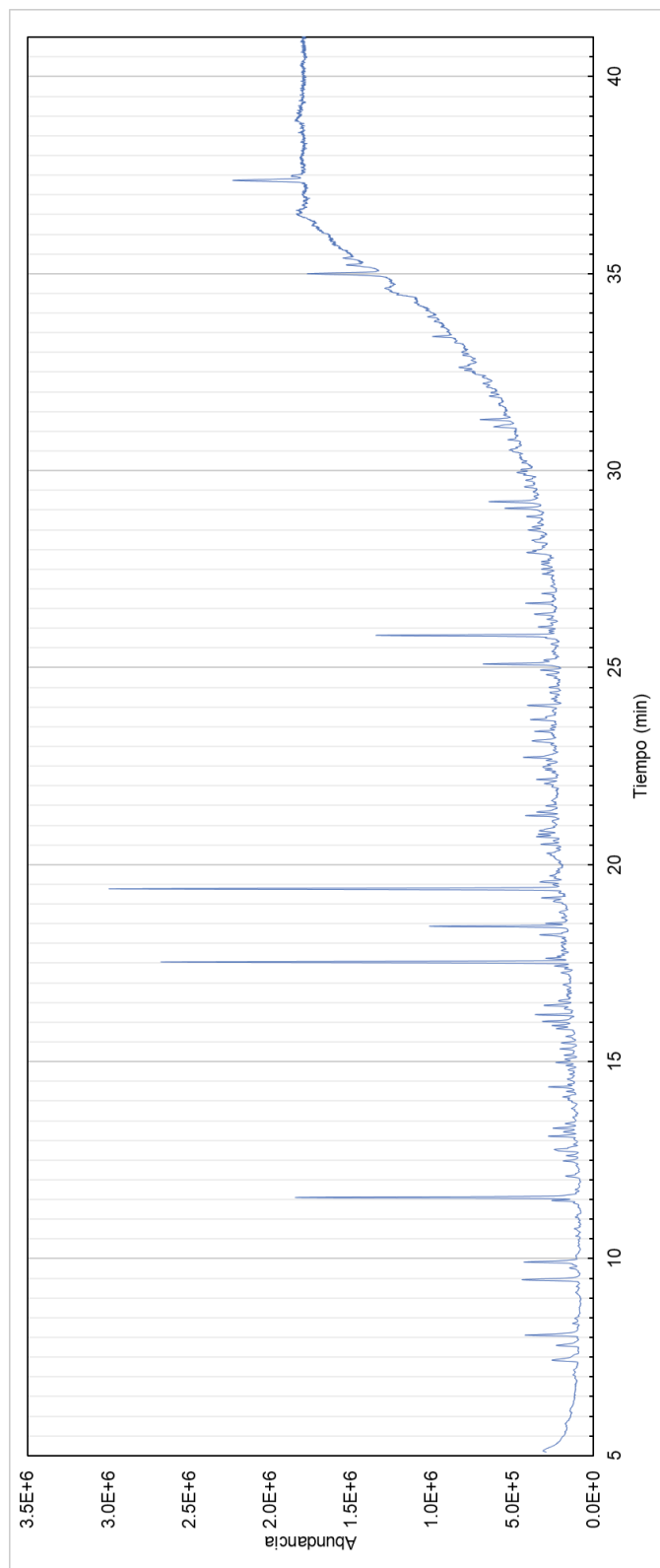


Fig. B.4. *Cromatograma del extracto ES1P.*

Tabla B.4. *Compuestos identificados en ES1P.*

t_R (min)	Compuesto	MF
5.1351	N-(Trifluoroacetyl)-N,O,O',O''-tetrakis(trimethylsilyl)norepinephrine	80.6
5.6225	4a,8a-(Methaniminomethano)naphthalene-9,11-dione, 10-phenyl-	83
8.0624	Propanoic acid, 2-methyl-, 3-hydroxy-2,2,4-trimethylpentyl ester	97.9
8.3596	Tetradecane	89.2
9.1546	5,9-Undecadien-2-one, 6,10-dimethyl-, (E)-	83.2
9.2955	Borane, diethyl(decyloxy)-	80.1
9.4719	2,5-cyclohexadien-1-one, 2,6-bis(1,1-dimethylethyl)-4-hydroxy-4-methyl-	81.9
9.7672	1-Pentadecene	94.5
9.8902	Undecane, 4,7-dimethyl-	90.4
10.0983	Pentanedioic acid, (2,4-di-t-butylphenyl) mono-ester	86.4
10.3378	Benzoic acid, 4-ethoxy-, ethyl ester	85.6
10.5811	Hexadecane	83.2
10.7655	n-Nonylcyclohexane	84
11.0588	Pentadecane, 3-methyl-	84.1
11.4163	Cyclohexane, 1,2-dimethyl- (cis/trans)	83.3
11.4792	Diethyl Phthalate (<i>DEP</i>)	97.9
11.5574	2,2,4-Trimethyl-1,3-pentanediol diisobutyrate (<i>TXIB</i>)	98.4
12.0862	Benzophenone	86.7
12.4851	Cyclopentane, undecyl-	81.9
12.6186	Octane, 1,1'-oxybis-	93.1
12.8171	1-Tetradecanol	86.8
13.1093	9-Eicosene, (E)-	86.6
13.2244	Nonane, 3-methyl-5-propyl-	91
13.424	Undecane, 5,5-dimethyl-	80.5
14.0619	Octanal, 2-(phenylmethylene)-	85.1
14.2468	Cyclohexane, octyl-	86
14.3628	3,5-di-tert-Butyl-4-hydroxybenzaldehyde	93.6
14.5795	Phenanthrene	91
14.7914	Cyclopentane, 1-butyl-2-propyl-	80
14.7947	Cyclopentane, 1,2-dimethyl-3-(1-methylethyl)-	88.5
14.9044	Hexadecane	87.2
14.9822	5,5-Diethylpentadecane	89.8
15.0667	Hexadecane, 2,6,10,14-tetramethyl- (<i>Fitano</i>)	81.3
15.1715	Pentadecanal-	90.9
15.3312	Isopropyl myristate	90.6
15.6468	2-Pentadecanone, 6,10,14-trimethyl-	86
15.9195	1-Octadecanol	90.5
16.0267	1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-methylpropyl) ester (<i>DiBP</i>)	96.3
16.051	7-Acetyl-6-ethyl-1,1,4,4-tetramethyltetralin (<i>Versalide</i>)	83
16.1963	1-Hexadecanol	96.5
16.4307	1-Decanol, 2-hexyl-	90.1
16.5478	Hexane, 3,3-dimethyl-	87.6

Tabla B.4. *Compuestos identificados en ES1P.* (continuación)

t_R (min)	Compuesto	MF
16.9199	1H-Indene, 1-phenyl-	91
17.4323	3-Ethyl-3-methylheptadecane	81.2
17.5346	Dibutyl phthalate (<i>DnBP</i>)	98.4
17.6285	n-Tridecylcyclohexane	84.3
18.2231	5,5-Diethylheptadecane	88.6
18.4402	Octadecanal	98.6
18.5144	Isopropyl palmitate	89.5
18.8027	9,10-Dihydro-9,10-dimethyl-9,10-ethanoanthracene-11,12-dicarboxylic acid, dimethyl ester	83.5
19.0077	Fluoranthene	92
19.0748	3,3-Diethylheptadecane	80.7
19.3918	1-Octadecanol	98.6
19.5665	1-Nonadecene	91.2
19.6633	4,4-Dimethyl octane	82.1
20.1891	Phenol, 4-dodecyl-	81.5
20.2984	Oxalic acid, dineopentyl ester	81
20.5272	3-Ethyl-3-methylnonadecane	86.8
20.773	n-Pentadecylcyclohexane	85.8
20.8728	o,p'-DDE	83.8
21.2475	5,5-Diethylheptadecane	85.2
21.3465	2-Isopropyl-10-methylphenanthrene	92.8
22.0644	3,3,13,13-Tetraethylpentadecane	85.4
22.4676	1-Hexadecanol	82.8
22.7296	2(3H)-Furanone, dihydro-5-tetradecyl-	84.7
23.1504	Methyl dehydroabietate	85.4
24.0479	3-Methyltetracosane	85.4
24.9426	n-Heptadecanol-1	87.6
25.0989	Oleanitrile	81.7
25.8252	Bis(2-ethylhexyl) phthalate (<i>DEHP</i>)	98.6
26.0399	Tetracosane, 3-ethyl-	81.3
26.3583	Cyclohexane, nonadecyl-	90.1
26.6406	3-Methylhexacosane	83.1
26.8835	Sulfurous acid, cyclohexylmethyl heptadecyl ester	81.3
27.5048	Cyclopentane, heneicosyl-	81
28.2403	1,4-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-ethylhexyl) ester (<i>DEHT</i>)	90
28.8436	n-Heptadecylcyclohexane	80.6
29.2189	Squalene	93.3
29.3525	Cyclohexane, 1-isopropyl-1-methyl-	84.7
29.4765	Cyclohexanone, 3-(3,3-dimethylbutyl)-	82
29.7629	threo-2,5-Dimethyl-2-(2-methyl-2-tetrahydrofuryl)tetrahydrofuran	81.8
29.9586	Cholesta-3,5-diene	80.4
30.0254	Dodecane, 2-methyl-	81.9
30.7887	Nonane, 4,5-dimethyl-	80.8
31.1581	1,1'-Bicyclohexyl	83.5
31.7816	Pyrrole, 2-methyl-5-phenyl-	84.9
32.13	Cyclohexane, 1-ethyl-2-propyl-	80.8

Tabla B.4. *Compuestos identificados en ES1P. (continuación)*

t_R (min)	Compuesto	MF
32.6289	1-Decanol, 2-octyl-	82.6
35.0058	.beta.-Amyrone	78
35.2267	.alpha.-Amyrin	81

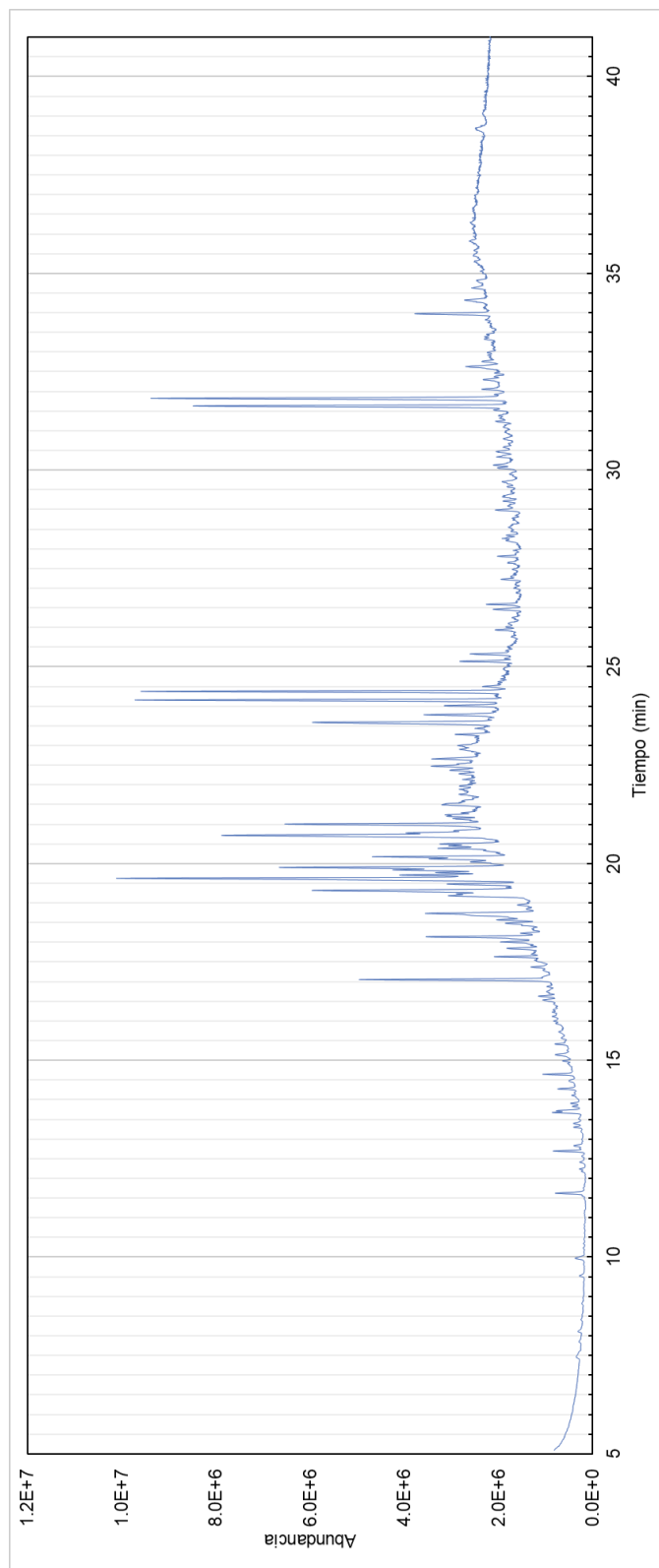


Fig. B.5. *Cromatograma del extracto ES1F.*

Tabla B.5. *Compuestos identificados en ES1F.*

t_R (min)	Compuesto	MF
8.1126	Propanoic acid, 2-methyl-, 3-hydroxy-2,2,4-trimethylpentyl ester	89.7
8.8245	4,7-methano-1H-inden-5-ol, 3a,4,5,6,7,7a-hexahydro-, acetate	88
9.9573	Pentadecane	90.8
10.3461	Undecanoic acid, 10-methyl-, methyl ester	81.1
11.5573	Diethyl Phthalate (<i>DEP</i>)	97.4
11.6295	2,2,4-Trimethyl-1,3-pentanediol diisobutyrate (<i>TXIB</i>)	96.3
12.2443	Benzene, (1-butylheptyl)-	92.2
12.4135	Benzene, (1-propyloctyl)-	90.8
12.698	Octane, 1,1'-oxybis-	97.3
12.7677	Benzene, (1-ethylnonyl)-	82.3
13.3051	Heptadecane	94.6
13.3863	Benzene, (1-methyldecyl)-	91.9
13.4093	Sulfurous acid, 2-ethylhexyl nonyl ester	91.1
13.6786	Phenol, 2-(1-phenylethyl)-	84.9
13.7242	Methyl tetradecanoate	92.9
13.832	Benzene, (1-pentylheptyl)-	90.4
13.9109	Benzene, (1-butylloctyl)-	92.7
14.1155	Benzene, (1-propylnonyl)-	86.8
14.4548	3,5-di-tert-Butyl-4-hydroxybenzaldehyde	87
14.6495	Benzene, 1,1'-(3-methyl-1-propene-1,3-diyl)bis-	96.9
14.99	Octadecane	90
15.1124	Benzene, (1-methylundecyl)-	88.8
15.1511	Hexadecane, 2,6,10,14-tetramethyl- (<i>Fitano</i>)	91.9
15.4193	Isopropyl myristate	91.6
16.1406	Isophthalic acid, di(2-fluorophenyl) ester	80.5
16.6331	Nonadecane	84
17.0552	Hexadecanoic acid, methyl ester	98.1
17.6377	Dibutyl phthalate (<i>DnBP</i>)	95.6
18.0037	3,5-Dimethyl-1-dimethylphenylsilyloxybenzene	81.8
18.1489	2-Amino-4-phenylpyrimidine	81.7
18.2324	Eicosane	90.1
18.579	4b,8-Dimethyl-2-isopropylphenanthrene, 4b,5,6,7,8,8a,9,10-octahydro- (<i>Dehidroabietino</i>)	87.5
18.6164	Isoparvifuran	88.4
19.4969	1-Tetradecanol	85.5
19.8846	9-Octadecenoic acid, methyl ester	86.3
20.1772	Methyl stearate	94.5
21.2441	Docosane	85.6
21.4863	2-Isopropyl-10-methylphenanthrene	84.2
22.6628	Tricosane	91
23.287	Methyl dehydroabietate	90.3
23.3589	Heptane, 3-methyl-	83.2
24.0195	Tetracosane	89.5
24.1639	Phenol, 2,4-bis(1-phenylethyl)-	80.7
24.3831	Phenol, 2,4-bis(1-phenylethyl)-	80.7
24.4868	Nonane, 5-methyl-5-propyl-	80.4

Tabla B.5. *Compuestos identificados en ES1F.* (continuación)

t_R (min)	Compuesto	MF
25.1447	Phenol, 2,4-bis(1-phenylethyl)-	87.5
25.3308	Pentacosane	94.2
25.9449	Bis(2-ethylhexyl) phthalate (<i>DEHP</i>)	90.1
26.5927	Hexacosane	94.1
27.8147	Heneicosane	86.7
28.9915	Octacosane	88
30.133	Hentriacontane	83
31.2372	Triacotane	82
32.2985	Tetracosane	81.6

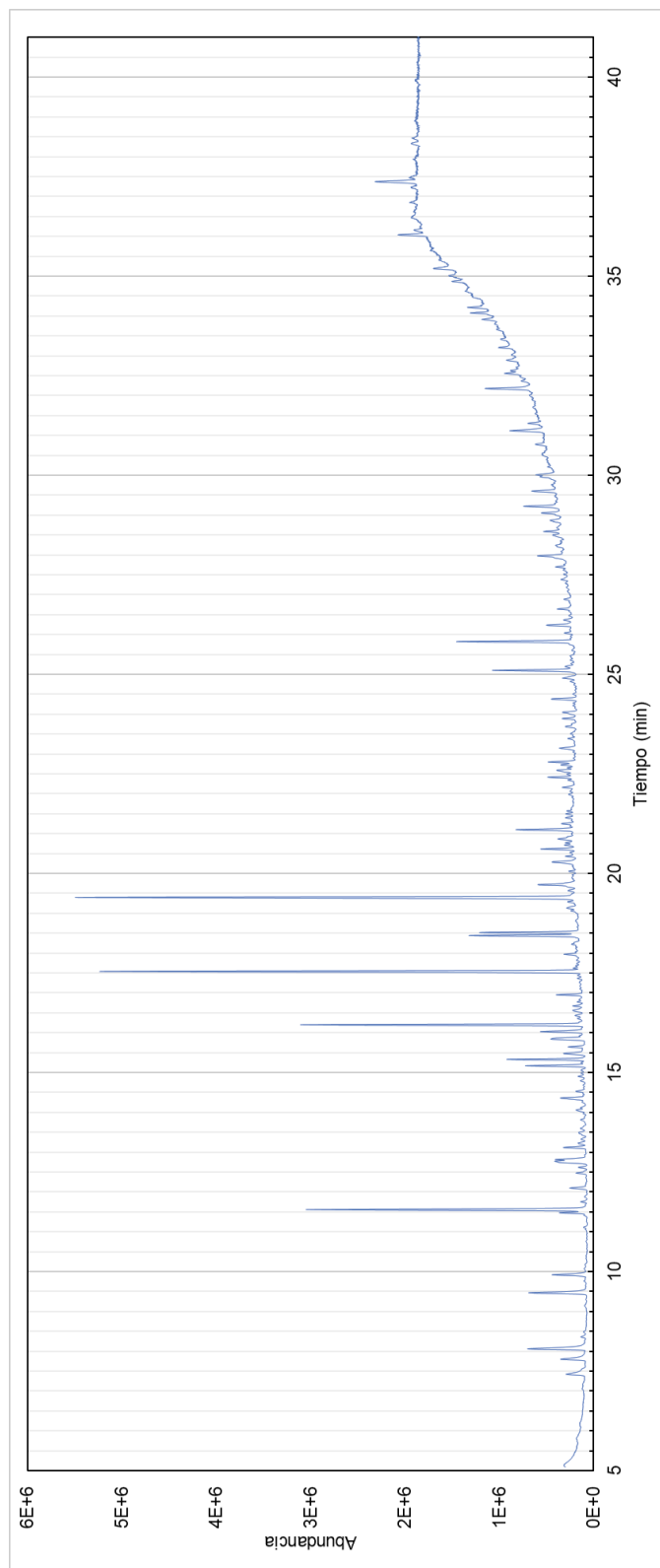


Fig. B.6. *Cromatograma del extracto EB3F.*

Tabla B.6. *Compuestos identificados en EB3F.*

t_R (min)	Compuesto	MF
5.6468	d-Proline, N-methoxycarbonyl-, heptyl ester	86.4
6.1499	Benzothiazole	88.4
8.0599	Propanoic acid, 2-methyl-, 3-hydroxy-2,2,4-trimethylpentyl ester	97.8
8.3602	Tetradecane	87.3
9.469	2,5-cyclohexadien-1-one, 2,6-bis(1,1-dimethylethyl)-4-hydroxy-4-methyl-	80.5
9.7638	1-Nonanol	83
9.8893	Undecane, 3,8-dimethyl-	92.9
10.1711	Butylated Hydroxytoluene	80.5
10.3342	Benzoic acid, 4-ethoxy-, ethyl ester	83.9
10.7607	2-(1-Methylcyclopentyloxy)-tetrahydropyran	80.7
11.1099	Cyclopentane, hexyl-	89
11.415	n-Tridecan-1-ol	81.1
11.4763	Diethyl Phthalate (<i>DEP</i>)	98.8
11.5562	2,2,4-Trimethyl-1,3-pentanediol diisobutyrate (<i>TXIB</i>)	98.5
11.751	Pentadecanal-	85.5
12.4765	Cyclopentaneacetic acid, 3-oxo-2-pentyl-, methyl ester	90
12.6186	Octane, 1,1'-oxybis-	92.7
12.8132	1-Tetradecanol	98.3
13.1108	Cyclooctane, 1,5-dimethyl-	85.9
13.2243	Tetradecane	85.3
13.3447	1,2-Benzenediol, o-(4-methoxybenzoyl)-o'-(5-chlorovaleryl)-	87.8
13.4657	Bicyclo[4.1.0]heptane, 7-butyl-	89
14.0603	Octanal, 2-(phenylmethylene)-	89.9
14.1199	1,2-Benzenediol, o-(4-methoxybenzoyl)-o'-(2,2,3,3,4,4,4-heptafluorobutyryl)-	87.2
14.3301	Ambrox	82.9
14.3607	3,5-di-tert-Butyl-4-hydroxybenzaldehyde	92.7
14.5201	1-Dodecanol	87.3
14.789	5-Octadecene, (E)-	88.1
14.9004	Octadecane	84.1
15.1679	Hexadecanal	98.2
15.2466	Benzoic acid, 4-(4-propylcyclohexyl)-, 4'-cyano[1,1'-biphenyl]-4-yl ester	81.3
15.3296	Isopropyl myristate	98.8
15.4512	3-Methylbenzoic acid, 2-methylbutyl ester	84.3
15.6426	2-Pentadecanone, 6,10,14-trimethyl-	94.9
15.8356	Cyclopenta[g]-2-benzopyran, 1,3,4,6,7,8-hexahydro-4,6,6,7,8,8-hexamethyl- (<i>Galaxolide</i>)	95.8
15.9167	Cyclopentane, pentyl-	80.9
16.0246	1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-methylpropyl) ester (<i>DiBP</i>)	97
16.0458	Tonalid	90.8
16.1976	1-Hexadecanol	99
16.4274	3-Octadecene, (E)-	89.2
16.9497	Hexadecanoic acid, methyl ester	94.8

Tabla B.6. *Compuestos identificados en EB3F.* (continuación)

t_R (min)	Compuesto	MF
17.5378	Dibutyl phthalate (<i>DnBP</i>)	98.4
18.2607	1-Hexadecanol, acetate	80.8
18.4376	Octadecanal	98.5
18.514	Isopropyl palmitate	96.3
19.1576	3-Octen-2-one, 7-methyl-	81.3
19.396	1-Octadecanol	98.6
19.7126	Dodecanoic acid, isooctyl ester	92.1
19.7547	DDMU	89.5
20.0532	Methyl stearate	83.7
20.4278	Bis(2-ethylhexyl) maleate	86.5
20.6126	2-Propenoic acid, 3-(4-methoxyphenyl)-, 2-ethylhexyl ester	88.4
20.8686	p,p'-DDE	90.2
21.0955	1-Dodecanol, 2-octyl-	94.3
21.1188	Benzoic acid, 2-methylpropyl ester	81.2
21.5668	2-Butenedioic acid (E)-, bis(2-ethylhexyl) ester	91.3
22.3399	3-Octadecene, (E)-	84.6
22.7955	2-Propenoic acid, 3-(4-methoxyphenyl)-, 2-ethylhexyl ester	95.4
23.1461	Methyl dehydroabietate	90.6
23.3842	Hexane, 2,3-dimethyl-	84.8
23.4456	2-Acetyl-2-methyltetrahydrofuran	89.4
23.8854	Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester	92.7
24.0415	3-Methyltetracosane	85.5
24.9019	Hexanoic acid, 2-ethyl-, hexadecyl ester	88.8
25.0964	Oleanitrile	83.1
25.374	Benzoic acid, 2-methylpropyl ester	82.4
25.8197	Bis(2-ethylhexyl) phthalate (<i>DEHP</i>)	98.8
26.3588	Cyclohexane, nonadecyl-	84.2
26.4724	Sulfurous acid, 2-ethylhexyl hexyl ester	84.2
26.6365	3-Methylhexacosane	80.6
26.8824	Sulfurous acid, cyclohexylmethyl hexadecyl ester	81.4
27.6941	Hexacosane, 1-iodo-	83.4
28.0358	3,3-Diethoxy-1-propyne	86
28.2362	1,4-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-ethylhexyl) ester (<i>DEHT</i>)	89.7
28.5841	13-Docosenamide, (Z)-	82.9
28.8649	2-Methyltetracosane	84.6
29.2165	Squalene	94.1
29.957	Cholest-5-en-3-ol (3.beta.)-, propanoate	83.1
30.0069	Octacosane	86.7
30.5257	2(5H)-Furanone, 5,5-dimethyl-	80.2
30.5343	Benzenamine, 4-(1,1,3,3-tetramethylbutyl)-N-[4-(1,1,3,3-tetramethylbutyl)phenyl]-	81.5
31.1113	Octacosane	81.3
32.1734	Hentriacontane	93.4
33.2035	Heptadecane, 2,6,10,15-tetramethyl-	86.4
34.0744	16-Hentriacontanone	86.9
34.2105	Heneicosane	90.6
34.9966	.beta.-Amyrone	69
36.1467	Hexadecane	83.1

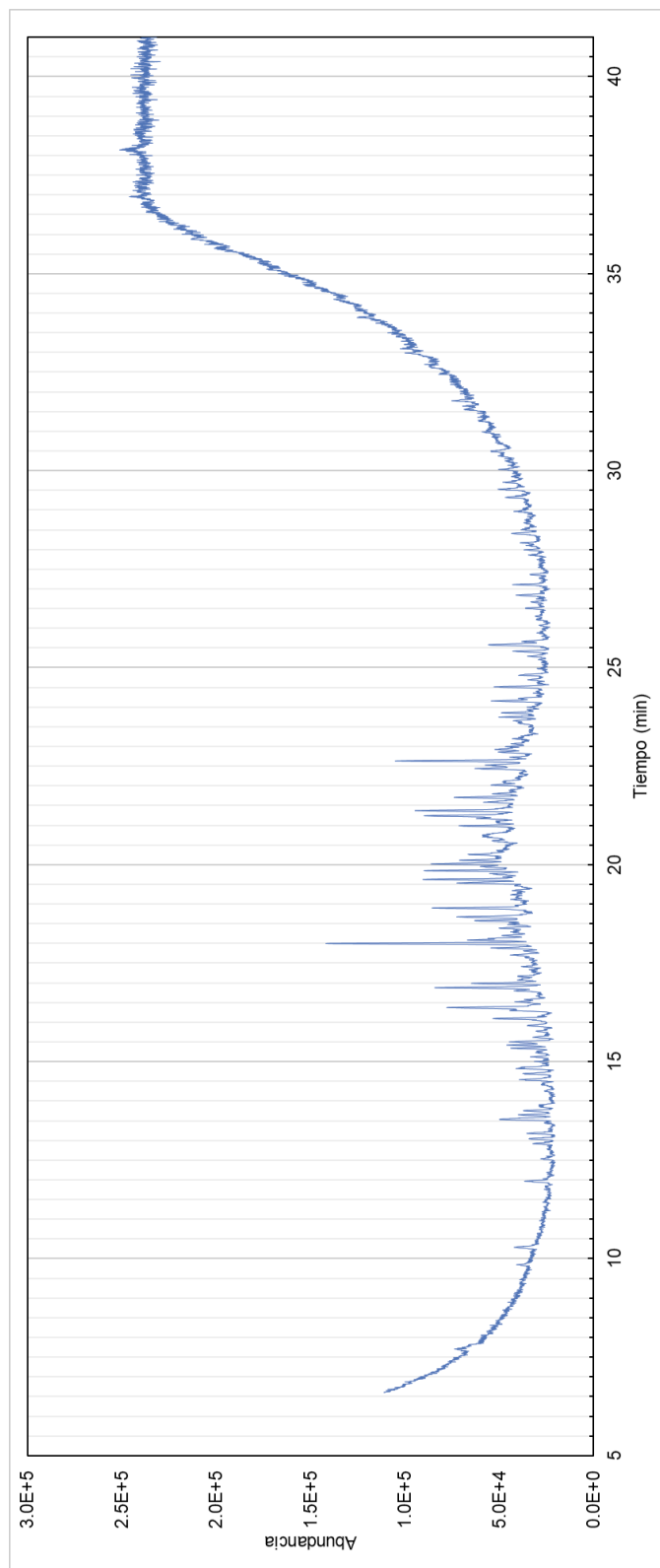


Fig. B.7. *Cromatograma del extracto EB3AFE.*

Tabla B.7. *Compuestos identificados en EB3AFE.*

t_R (min)	Compuesto	MF
12.8046	Propanamide	80.4
13.0369	Sulfurous acid, hexyl octyl ester	82.9
13.5242	5-Octadecene, (E)-	87.2
13.6429	3-Hexanone, 2,5-dimethyl-	84.8
14.5358	3-Hexanone, 2,5-dimethyl-	85.8
14.683	Cyclohexane, octyl-	82.3
15.3335	Dodecane, 1-iodo-	87.5
16.0867	2-Pentadecanone, 6,10,14-trimethyl-	83.5
16.3238	Galaxolide 1	81.7
16.3651	3-Octadecene, (E)-	87.7
16.7837	Heptane, 3-ethyl-5-methylene-	81.8
16.8721	3-Eicosene, (E)-	91.6
16.9791	Sulfurous acid, 2-ethylhexyl isohexyl ester	90
17.9926	Dibutyl phthalate (<i>DnBP</i>)	96.3
18.0814	Cyclohexane, undecyl-	84.8
18.5691	Decane, 6-ethyl-2-methyl-	85.3
18.6682	5,5-Diethylheptadecane	81
18.8917	Pentadecanal-	93.7
19.6167	Cyclotetradecane	82.4
19.7527	Octane, 2-bromo-	84
19.842	1-Decanol	84.9
20.1025	Decane, 3-bromo-	87.1
20.982	3-Ethyl-3-methylnonadecane	80.4
21.2383	Cyclohexane, undecyl-	86.1
21.3713	p,p'-DDE	82
22.5226	Propanoic acid, 2-acetylhydrazono-	87.2
24.1496	Cyclohexane, octadecyl-	84.9
25.2856	Octane, 2,3-dimethyl-	84.7
25.6603	Sulfurous acid, 2-ethylhexyl hexyl ester	82.1
28.1575	Sulfurous acid, 2-ethylhexyl hexyl ester	81.8
29.3187	3-Methyl-1-[(1H)-1,2,4-triazol-1-yl]butan-2-one	81.8
31.6332	Cyclohexane, decyl-	80.9
31.7717	Nonane, 5-methyl-5-propyl-	83.9
31.8507	Propyne	82.3
32.6244	Pentane, 2,2,4-trimethyl-	87.5