



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS

CON EL TEMA

**“ÁMBAR DE CHIAPAS. DENOMINACIÓN DE ORIGEN
SUSTENTADA EN LOS MÉTODOS DE PRUEBA DERIVADOS
DE LA NORMA NOM-152-SCFI-2019 Y
COMPLEMENTARIOS”**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
QUÍMICA**

PRESENTA

BRENDA CRISTINA HERNÁNDEZ PÉREZ

Ciudad Universitaria, CD. MX 2024





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: Rivera Torres Filiberto

VOCAL: Profesor: Lozano García Felipe

SECRETARIO: Profesora: Ramírez Pérez Tonantzin

1er SUPLENTE: Profesora: Valverde Labastida Mayte Saraí

2° SUPLENTE: Profesor: Padilla Gómez Zurisadai

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: Unidad de Metrología, con el apoyo del Instituto de Ingeniería, Instituto de Investigaciones en Materiales y la unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación y a la Industria.

ASESOR DEL TEMA:

M. en A. I. Tonantzin Ramírez Pérez

SUPERVISOR TÉCNICO:

Dr. Alfredo Maciel Cerda

SUSTENTANTE:

Brenda Cristina Hernández Pérez

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, por recibirme desde la Preparatoria plantel 8 Miguel E. Schulz y por incluirme como un miembro más de esta institución a la que me honra pertenecer, así como también a la Facultad de Química, recinto que considero mi segunda casa, que me ha visto crecer y desarrollarme profesionalmente.

Estoy profundamente agradecida con la M. en A.I. Tonantzin Ramírez Pérez por aceptarme en este proyecto tan importante, por asesorarme para lograr este escrito y por compartirme su vocación por la educación y en especial por la Metrología, así como a la Unidad de Metrología por permitirme hacer uso de sus instalaciones y equipos.

Al Dr. Alfredo Maciel Cerda, mi supervisor técnico, que me permitió ser su alumna en el Instituto de Investigaciones en Materiales, por sus valiosas aportaciones a este escrito y por poner a mi disposición los equipos del IIM para concluir con las pruebas para el ámbar.

Agradezco al Dr. Filiberto Rivera Torres por su colaboración para la prueba de densidad con el picnómetro, así como por el vínculo con el Instituto de Investigaciones en Materiales.

Una mención importante para el Lic. Luis Alonso Zúñiga Mijangos, Director del Museo del Ámbar Lilia Mijangos de San Cristóbal de las Casas, Chiapas, por compartir sus conocimientos sobre el ámbar chiapaneco, además de colaborarnos con muestras de ámbar de Chiapas y el Báltico; gracias a eso se logró completar el presente trabajo y abrir el paso a más respuestas.

Al Laboratorio de Ingeniería Ambiental-Instituto de Ingeniería, UNAM que cuenta con certificado de conformidad (CMX C SGC 209 2020) otorgado por Certificación Mexicana, S.C., por implementar y mantener un Sistema de Gestión de la Calidad conforme con ISO 9001:2015, por las facilidades para realizar las pruebas de infrarrojo.

A la Dra. Lorena Martínez de la Cruz de la USAII por permitirnos colaborar con ella y apoyarnos con el análisis por DSC para todas nuestras muestras de ámbar.

Al Dr. Miguel Ángel Canseco Martínez del Instituto de Materiales por el préstamo del aditamento para IPFNA para la determinación de la densidad, así como por apoyarnos para obtener los espectros de infrarrojo de las últimas muestras adquiridas.

A el M. en M. Sergio García Galán y al I.Q.M. Agustín Ruíz Ramírez del Departamento de Metalurgia-Facultad de Química, UNAM por el apoyo brindado para el corte de la muestra de Amb-01.

DEDICATORIA

Le dedico el resultado de este trabajo a mis padres Trinidad de la Luz y Miguel Ángel, que me han apoyado siempre, que han sido y seguirán siendo mi fortaleza en los momentos buenos y malos. Gracias a ustedes soy la persona del día de hoy, les agradezco la confianza, la libertad, la educación y los valores brindados durante estos 24 años. Siempre estaré agradecida por mi vida acompañada y guiada por ustedes, los amo.

Al resto de mi familia, mis hermanos, mis tías y mis abuelas, agradezco la motivación continua, el apoyo en todo momento, la comprensión brindada y su cariño. De igual manera contribuyen a mi vida con su granito de arena todos los días, créanme que he aprendido mucho de todos.

También le dedico y agradezco profundamente a mis amigas de primer semestre Alma, Maya, Tania y Vero, porque sin ellas no hubiera sobrevivido el inicio de la Licenciatura, nuestros caminos se bifurcaron, pero la amistad sigue intacta. A Mariel, Alexa y Rigoberto, a quienes fui conociendo a lo largo de la carrera, y que han sido grandes compañeros, consejeros y amigos. Así como también al team Purísimas: Karen, Fany, Sandra y Frida; y a mis amigos Q's Judith, Shaina y Miguel.

A la Maestra Tonantzin Ramírez, por su cálido recibimiento y porque más allá de ser mi asesora ha sido una gran consejera de vida, gracias por contagiarme siempre su buena vibra y por recibirme con una sonrisa.

Y, por último, pero no menos importante, le dedico este escrito a mi yo del 2017 que no tenía ni idea de que estudiar y tomó un camino poco conocido y arriesgado. Cristina, te costó mucho trabajo terminar, hubo muchos momentos de crisis, pero fueron más los momentos felices, de disfrute y aprendizaje, espero que sigas sembrando semillas de lo que quieres cosechar. Me siento muy orgullosa de nuestros logros.

ÍNDICE

LISTA DE ABREVIATURAS	9
1. RESUMEN	10
2. INTRODUCCIÓN	12
3. MARCO TEÓRICO.....	14
3.1 Ámbar	15
3.2 Agentes de deterioro y conservación del ámbar	16
3.3 Historia.....	17
3.4 Falsificaciones	18
3.5 Ámbar de Chiapas	20
3.5.1 Denominación de origen	21
3.5.2 Consecuencias de usar la lámpara de luz ultravioleta	21
3.6 Principios de técnicas analíticas	22
3.6.1 Espectroscopía de infrarrojo	22
3.6.2 Análisis Termogravimétrico	24
3.6.3 Calorimetría Diferencial de Barrido	26
5. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	30
5.1 Objetivo general.....	30
5.2 Objetivos específicos	30
5.3 Hipótesis.....	30
6. MATERIALES Y MÉTODOS	31
6.1 Pruebas normadas	31
6.1.1 Infrarrojo.....	31
6.1.2 Comportamiento con la luz ultravioleta (UV)	33

6.1.3 Solubilidad en etanol	34
6.1.4 Dureza Shore D.....	36
6.2 Pruebas complementarias	37
6.2.1 Identificación visual y sensorial	37
6.2.2 Fuerza Electroestática.....	38
6.2.3 Densidad	38
6.2.4 Análisis termogravimétrico	43
6.2.5 Calorimetría Diferencial de Barrido	43
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
7.1 Pruebas normadas	44
7.1.1 Infrarrojo.....	44
7.1.2 Comportamiento con la luz ultravioleta	50
7.1.3 Solubilidad en etanol	52
7.1.4 Dureza Shore D.....	53
7.2 Pruebas complementarias	54
7.2.1 Identificación visual y sensorial	55
7.2.2 Fuerza Electroestática.....	56
7.2.3 Densidad	57
7.2.4 Análisis Termogravimétrico y Calorimetría Diferencial de Barrido.....	59
8. CONCLUSIONES.....	75
9. RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS.....	77
ANEXOS	81
Anexo 1. Fotografías de las muestras, instrumentos y equipos.....	81
Anexo 2. Espectros de infrarrojo.....	84

Anexo 3. Termogramas de TGA	86
Anexo 4. Formato en excel para la identificación visual y solubilidad en etanol.	88
Anexo 5. Cartas de trazabilidad.....	89

LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Definición
ATR	Reflectancia Total Atenuada
CCM	Comité Consultivo de Masa
DSC	Differential Scanning Calorimetry / Calorimetría Diferencial de Barrido
DTG	Derivative Thermogravimetry/ Termogravimetría Derivada
ema	Entidad Mexicana de Acreditación
FTIR	Fourier Transform Infra-Red/ Espectroscopia por Infrarrojo con Transformadas de Fourier
ICTAC	International Confederation for Thermal Analysis and Calorimetry / Confederación Internacional de Análisis Térmico y Calorimetría
ID	Identificación
IPFNA	Instrumento para Pesar de Funcionamiento No Automático
TGA	Thermal Gravimetric Analysis / Termogravimetría

1. RESUMEN

Este trabajo se enfoca en la búsqueda de las pruebas que permitan identificar piezas genuinas de ámbar de Chiapas de entre otros orígenes, con base en lo establecido en la NOM-152-SCFI-2019, con el objetivo de contribuir a la denominación de origen, optimizar su comercialización, así como posicionar el arte que se realiza con este material. Las pruebas descritas en la norma mencionada que deben cumplir las piezas son: (1) infrarrojo (IR), mediante la indexación de diez bandas de los espectros experimentales con el espectro ejemplo que contiene la norma, (2) incidencia de luz ultravioleta (UV), en donde se debe observar un cambio de color del ámbar a azul o verde; y en caso de duda, se aplican los métodos de: (3) solubilidad, en la que se evalúa que el ámbar sea insoluble en etanol y (4) dureza Shore D, en la cual se debe obtener un valor de $86 \% \pm 5\%$. Las cuatro pruebas incluidas en la NOM-152-SCFI-2019 buscan evaluar la autenticidad del ámbar de Chiapas por medio de métodos físicos y químicos. Es importante señalar que esto es bajo el criterio de que la materia prima sea extraída conforme a la Declaración General de Protección de la Denominación de Origen Ámbar de Chiapas. Lo cual protegería a los consumidores de las falsificaciones y de manera directa a los artesanos y mineros del ámbar.

Dado que, de las pruebas contenidas en la NOM, solo la prueba de luz ultravioleta permite diferenciar plenamente al ámbar de entre las falsificaciones, aunque sin determinar el origen, se propusieron pruebas complementarias que permitan evaluar otros aspectos del ámbar, para clasificar las piezas con mayor probabilidad de evitar falsos positivos, en ellos incluimos: identificación visual y sensorial (color, apariencia, textura, homogeneidad y sensación térmica), prueba de carga electrostática y densidad.

Aunado a esto, al aplicar la prueba de infrarrojo a piezas de ámbar de las regiones antes mencionadas no se observaron diferencias significativas, por lo que se requiere de otras técnicas analíticas para singularizar al ámbar de Chiapas del resto del mundo. Y en ese sentido se propusieron dos técnicas: un análisis termogravimétrico (TGA) y uno de calorimetría diferencial de barrido (DSC). La primera permite establecer semejanzas entre varias piezas de ámbar respecto a su origen: el segundo análisis sirve para conocer la edad aproximada de las piezas de ámbar, y ya que se tiene

conocimiento de que el ámbar chiapaneco es el más joven, comparado con el ámbar de la Región Báltica y con el de República Dominicana, podría marcar una diferencia entre las muestras (Ragazzi, 2003).

El resultado de la caracterización de las piezas de ámbar está acompañado por la estimación de la incertidumbre de la prueba de infrarrojo con el método de Propagación de Incertidumbre y la toma de decisión sobre el origen por medio de clasificación estadística, que permite clasificar una muestra nueva en un conjunto de subpoblaciones, después de haber establecido los criterios para cada una, lo cual se considera como *aprendizaje* supervisado y permite que la clasificación tenga una probabilidad conocida y previamente aceptada.

2. INTRODUCCIÓN

En esta tesis se presenta el resultado de las pruebas de análisis de piezas de ámbar de la región Báltica, República Dominicana y Chiapas, México, así como muestras falsas comercializadas como ámbar y muestras de copal, material que también se usa en la falsificación (Feist, 2007), con la finalidad de conocer las diferencias entre el origen de las muestras, poniendo a prueba los métodos contenidos en la NOM-152-SCFI-2019 para sustentar la denominación de origen del ámbar chiapaneco.

El contenido de este trabajo se presenta de la siguiente manera:

En el capítulo 3 se expone un panorama amplio sobre cómo se origina el ámbar, que es una resina fosilizada de hace 30 millones de años y, que desde hace tiempo se volvió una parte importante y representativa para nuestro país, ya que es un elemento cultural en la región del sureste mexicano, que se utiliza con la ideología de que protege a la persona que la porta, además, dada su belleza y misticismo se conjuntan para crear piezas de exposición y una gran parte de ellas también se comercializan. Todo esto genera una movilización en la región para extraerla, crear joyería y esculturas y ofrecerlas al público en general, lo que genera un impacto económico en las localidades que lo producen. Ahí se describen las características de los depósitos de ámbar en México, así como también los diversos métodos que los artesanos y comerciantes han puesto en práctica para identificar las falsificaciones de esta piedra semipreciosa. Y, por otra parte, se incorporan breves explicaciones sobre las técnicas analíticas que permitieron la caracterización de las muestras de ámbar con las que se realizó este trabajo.

La problemática social que nos indujo a iniciar esta investigación se describe en el capítulo 4, incluyendo la importancia económica, social y cultural en los últimos años para el sector ambarero.

En el capítulo 5 se describe el objetivo general de la investigación, así como los objetivos específicos, en los cuales se acota la forma en la que se alcanzará el resultado. Además, se incluye hipótesis enfocada en que la química analítica permita el reconocimiento del origen de las piezas de ámbar.

En el capítulo 6 se encuentra la metodología experimental de cada una de las pruebas realizadas, las características del material y las especificaciones metrológicas de los equipos utilizados, tales como marca, modelo, resolución, alcance, temperatura máxima y la trazabilidad en algunos casos. También se describen las muestras que fueron utilizadas en las pruebas, así como su preparación; es decir, si se utilizaron trozos pequeños, polvo o la pieza completa; las condiciones en las que se realizaron las mediciones y sí se manejó un software para poder leer y analizar los resultados.

Los resultados de las pruebas realizadas se muestran en el capítulo 7. En el caso de los análisis en los que se obtuvieron espectros o diagramas, solo se muestra un ejemplo en cada caso para el ámbar de cada región y para una falsificación, esto con la finalidad de marcar las diferencias y facilitar su identificación.

El capítulo 8 contiene la discusión de los resultados de todas las pruebas, es decir, el aporte que tiene la investigación al área de estudio, la comparación de las pruebas y como es que una tiene más peso que otras, así como el contraste con estudios previos. De la misma manera se anexan las conclusiones y la proyección que se puede dar a partir de este trabajo.

Algunas recomendaciones sobre el tratamiento de las muestras se mencionan en el capítulo 9, así mismo, se explican las consideraciones o perspectivas que se tienen para el tema, como es tomar un enfoque estadístico y analizarlo desde esa vertiente.

Finalmente, se anexan (1) fotografías tomadas de las muestras de ámbar de Chiapas, República Dominicana y el Báltico, de copal y de las falsificaciones, así como también de las pruebas realizadas, (2) los espectros de infrarrojo y los termogramas de TGA y DSC obtenidos, (3) el formato utilizado para la evaluación visual de las piezas, al igual que para el registro de las masas para la prueba de solubilidad y (4) las cartas de trazabilidad de las pruebas de densidad, solubilidad e infrarrojo.

3. MARCO TEÓRICO

El estudio de las resinas vegetales actuales y fósiles abarca diversos aspectos, desde el biológico, paleontológico y fisicoquímico. Las resinas se producen, en algunos grupos de plantas, como un mecanismo de defensa y secreción residual, ya que las protege de enfermedades, daño ambiental, ataque de plagas y fluctuaciones climáticas. La forma fosilizada de esta resina es el ámbar, el cual se forma a partir de azúcares, alcoholes, ácidos orgánicos y aceites esenciales. La característica más conspicua del ámbar es que preserva inclusiones de plantas y animales como un registro casi exacto de la vida del pasado de nuestro planeta, además de que refleja la luz y es transparente, con una dureza semejante al yeso mineral, es ligero y se fractura. Asimismo, es insoluble en alcohol y acetona, y se solubiliza en éter y cloroformo (Riquelme et al., 2017).

En contraste, el copal, que es un material que generalmente se utiliza para hacer falsificaciones de ámbar, es una resina de plantas actuales usada extensamente por sus propiedades aromáticas y balsámicas por diferentes sociedades. Es insoluble en agua y tolueno, pero soluble en alcohol, éter y acetona. Se quema al entrar en contacto con fuego y en ambientes cálidos se percibe blando. En adición a esto, es un mal conductor de electricidad, su color varía del amarillo al rojo pardo y tiende a ser semi translúcido o mate (Riquelme et al., 2017).

La solidificación de las resinas fósiles está determinada por sus características fisicoquímicas; en particular, la química molecular, la configuración de la cadena polimérica y la cristalinidad parcial. Como líquido viscoso durante la síntesis por la planta, la resina tiene cadenas moleculares cortas, pero se transforma en un polímero de peso molecular alto que es sólido, porque las macromoléculas se forman a partir de las más pequeñas durante el proceso de polimerización a temperatura ambiente. Así, las resinas fósiles están compuestas estructuralmente por cadenas moleculares de alto peso molecular obtenidas al polimerizar entre sí, las de bajo peso molecular. Por lo tanto, la longitud de las cadenas poliméricas, su estructura y propiedades químicas influyen en la capacidad de la resina fósil para solidificar y cristalizar parcialmente. En consecuencia, la rápida solidificación y la cristalinidad parcial del ámbar aumentan el

potencial de conservación de las inclusiones orgánicas atrapadas en él, porque inhiben la descomposición orgánica. (Riquelme et al., 2014).

3.1 Ámbar

El ámbar es una resina vegetal fosilizada. Su estructura interna es la de un polímero con fases semi cristalinas acrecentadas por los procesos de fosilización. La polimerización de la resina ocurre a temperatura ambiente, y puede tomar entre unos minutos hasta algunas horas o días a partir de que es secretada por la planta. La fracción volátil se disipa, pero los aceites y ácidos orgánicos persisten, volviéndose químicamente estables, resisten la degradación orgánica, y las condiciones de enterramiento en depósitos geológicos. Los compuestos terpenoides (hidrocarburos aromáticos) se solidifican aceleradamente al exponerse a la luz y a la atmósfera, formando así una masa resinosa endurecida. Al polimerizarse y separarse del árbol, la resina entonces se incorpora entre los suelos y sedimentos arenosos y arcillosos, los cuales se compactan convirtiéndose en rocas a través del tiempo geológico (Riquelme et al., 2017).

Además, los estudios espectroscópicos infrarrojos han indicado que muchas muestras de ámbar y copal se derivan de resinas que contienen diterpenoides con esqueletos predominantemente labdanos como el que se muestra en la Figura 1 (Brody, 2001).

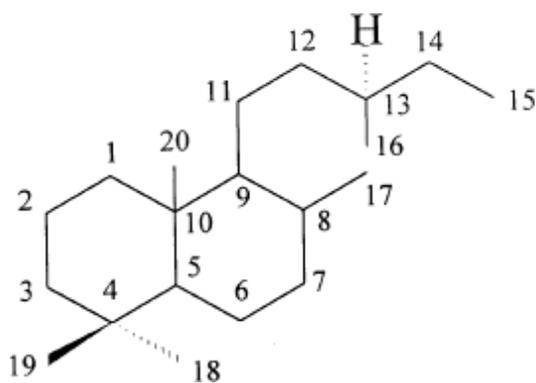


Figura 1. Estructura de una molécula de labdano.

El ámbar tiene una composición aproximada del 75 % C, 10 % H, 15 % O y 0.4 % S. Esta resina fosilizada consiste en un poliéster de resinas ácidas con un alto porcentaje

de ácido abiético ($C_{20}H_{30}O_2$) y solo entre un 3 % a 8 % de ácido succínico, resultando en una fórmula global para el ámbar $C_{10}H_{16}O$. Su punto de fusión varía entre 290 °C y 384 °C y, a veces puede ser más, entre 360 °C y 410 °C (Feist et al., 2007)

Su estructura cristalina es bastante compleja porque implica macromoléculas en lugar de átomos o iones. Al solidificarse y madurar químicamente en depósitos geológicos, el ámbar se comporta como un vidrio. Regularmente muestra un lustre cristalino, con una variedad de colores, incluyendo al más común amarillo dorado. Pero el lustre, opacidad y color del ámbar dependerán del grado de alteraciones post-enterramiento de las sustancias orgánicas que reaccionan al interior de la resina, así como iones metálicos e impurezas minerales de los sedimentos que interactúan igualmente con la resina (Riquelme et al., 2017)

La edad de esta resina fósil depende de la zona en donde se encuentre, el más antiguo data de hace casi 200 millones de años y fue encontrado en la región Báltica. En cambio, el ámbar más joven ha sido hallado en las minas de Chiapas, México y se calcula tiene una edad promedio de 25 millones de años. Otros países conocidos por la producción de ámbar son República Dominicana, Colombia, Madagascar e Italia. (Ragazzi et al., 2003).

3.2 Agentes de deterioro y conservación del ámbar

Los estudios realizados por el momento con muestras de ámbar terciarios (báltico, dominicano y mexicano) coinciden en mantener al ámbar en unas condiciones ambientales estables, sin fluctuaciones en lo referente a la temperatura (T) y la humedad relativa (HR) (Corral, 1999).

De acuerdo con Howie (1995), el ámbar es una sustancia que presenta una estabilidad variable en condiciones atmosféricas normales. Es afectado principalmente por: (1) factores ambientales adversos (altas temperaturas, humedad relativa fluctuante, radiación ultravioleta) y (2) oxígeno o sustancias químicas contaminantes.

Está universalmente aceptado que la temperatura ideal para la conservación óptima del ámbar no debería descender por debajo de 16 °C ni superar los 20 °C. Respecto a los valores apropiados de HR, con datos obtenidos por análisis de

espectroscopía infrarroja (FTIR), indican que el ámbar centroamericano es muy sensible a los cambios ambientales de humedad. El rango de humedad relativa más apropiado estaría entre el 35 % y 45 %. Por debajo se producen numerosas grietas y deformaciones, que con el tiempo pueden ser permanentes, y por encima la oxidación del ámbar se ve favorecida (Corral, 1999).

La oxidación del ámbar es provocada por el oxígeno atmosférico, siendo éste el principal agente de deterioro. La adición de oxígeno origina evidentes cambios físicos, como agrietamiento de la superficie o craquelado, acompañados de opacamiento y fragilidad causada por el desarrollo de grietas que pueden ocasionar la pérdida de fragmentos durante la manipulación de especímenes (Corral, 1999).

3.3 Historia

Los griegos llamaron por primera vez *élektron* a lo que hoy conocemos como ámbar, esto debido a que descubrieron sus propiedades eléctricas y volátiles al frotarlo y quemarlo. Para ser específicos, uno de los primeros en describir su poder de atracción fue Tales de Mileto, que le consideraba dentro de las sustancias “vivas”, con “alma”, pues estas tenían la propiedad de atraer otras sustancias inanimadas. Lo cual experimentó frotando el ámbar y atrayendo -por electrostática- virutas de papel y paja (Riquelme et al., 2017).

El ámbar es uno de los pocos materiales que ha sido usado por los humanos modernos en adornos e incipiente joyería desde la prehistoria. Diferentes sociedades le han asignado un alto valor cultural y por supuesto se ha recolectado y codiciado, tanto por su cautivante belleza como por un supuesto atributo mágico-curativo. Se ha encontrado ámbar, por ejemplo, en bisutería y recetas medicinales griegas, en ofrendas funerarias del área Maya y en muñecas y juguetes de niños romanos. Y, en el ámbito curativo, el ámbar era utilizado para aliviar diferentes alteraciones de la salud, por ejemplo, dificultades para orinar, calentura o molestias en el oído (Riquelme et al., 2017).

3.4 Falsificaciones

Algunos parámetros físicos relacionados con la mineralogía, como dureza, punto de fusión, gravedad específica y solubilidad, entre otros, se han usado para diferenciar el ámbar de otros materiales o de imitaciones. Pero el abuso de términos como “ámbar joven”, “ámbar fósil”, “copal”, “copal fósil”, entre otros, ha aumentado la confusión al intentar identificar el ámbar (Riquelme et al., 2017).

Se ha encontrado que, generalmente, las falsificaciones, es decir, piezas que son vendidas como ámbar, pero en realidad son fabricadas con otros materiales, están hechas con vidrio o plástico y, en algunos casos, para darle más realismo a la pieza se incrustan animales como alacranes, moscas o abejas e incluso tierra para que le dé un aspecto más natural a la pieza. De manera similar, el copal es utilizado para fabricar imitaciones de ámbar, ya que, como antes se mencionó, es una etapa por la que pasa la resina para convertirse en ámbar y, por ende, comparten características naturales (Figuras 2 y 3) (Guiliano et al., 2007).

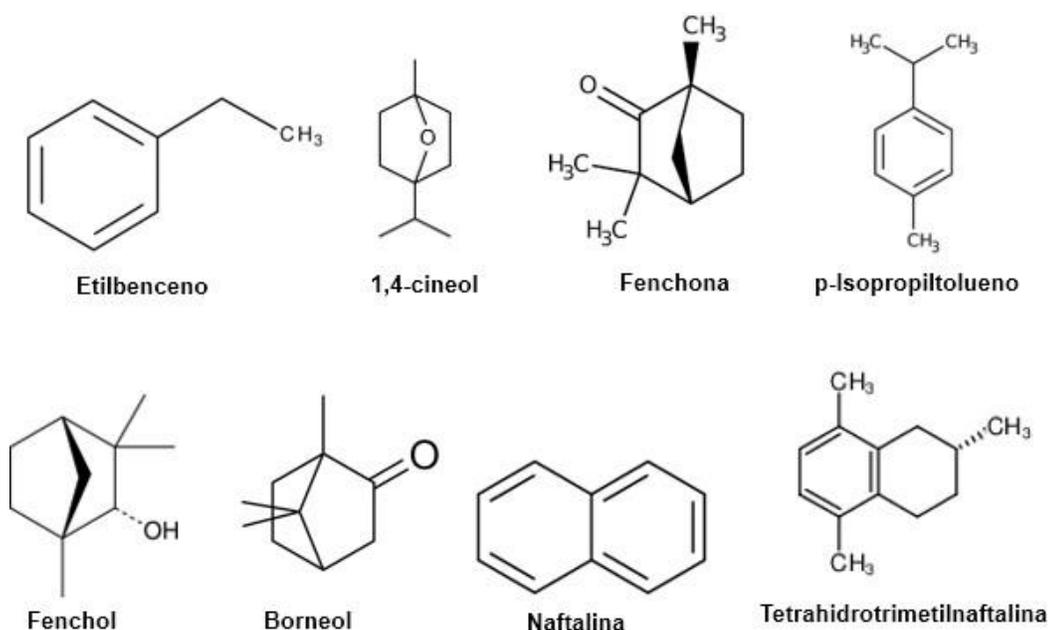


Figura 2. Estructuras de los componentes esenciales del ámbar (FEIST, 2007).

Por supuesto, los valores comerciales del ámbar y del copal no son comparables debido a la escasez, edad, inclusión de especies extintas y dureza del ámbar. Sin

embargo, debido a su solubilidad y temperatura de fusión relativamente baja (alrededor de 150 °C, el copal se derrite en lugar de quemarse), el copal se usaba a menudo para incorporar inclusiones falsas en la matriz del ámbar. Afortunadamente, este tipo de combinaciones o intentos de falsificación son rápidamente detectables por espectroscopía FTIR (Guiliano et al., 2007).

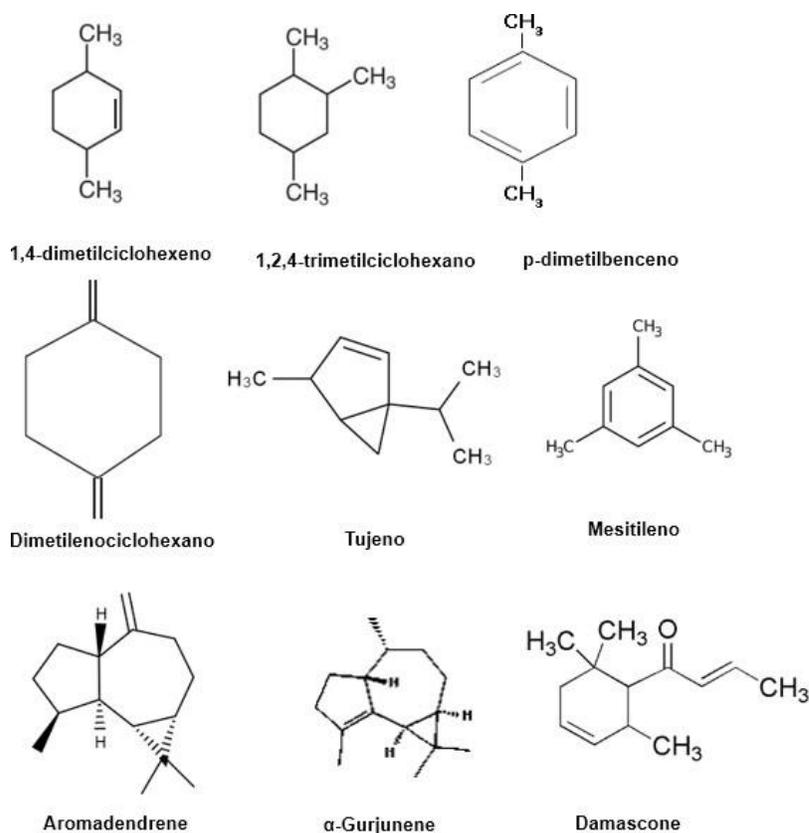


Figura 3. Estructuras de los componentes esenciales del copal. (Feist, 2007).

En consecuencia, se ha visto en aumento la presencia de falsificaciones de joyería de ámbar, por lo que es muy común que los comerciantes recurran a métodos rápidos para comprobar la autenticidad de su mercancía. Lo más común es acercar el ámbar a la flama de un cerillo o un encendedor, para poder demostrar que su producto no es de plástico, ya que el ámbar se quema, y desprende un aroma a copal, mientras que el plástico se derrite y tiene un olor desagradable. Así como también, usar una lámpara de luz ultravioleta ya que el ámbar cambia de color a un tono azul o verde. En adición a esto, el ámbar “no pesa” en comparación con las falsificaciones hechas de

vidrio (La cueva del ámbar de Chiapas, 2020). Y, en ese sentido, la densidad del ámbar, que tiene un valor de entre $1.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ y $1.10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, le permite flotar en agua salada, por eso el ámbar báltico había sido encontrado varado en playas o flotando en el mar cerca de las costas especialmente después de eventos de tormenta (Lambert & Poinar, 2002). Entonces podrían usarse pruebas de flotabilidad, pero no siempre permiten distinguir el ámbar de algunos polímeros sintéticos. Y, finalmente, el hecho de que el ámbar adquiera propiedades electrostáticas, después de frotarlo, agrega una característica más que puede ser puesta a prueba (Guiliano et al., 2007).

3.5 Ámbar de Chiapas

En Chiapas, México existen 7 municipios en donde se han descubierto minas de ámbar: Simojovel de Allende, Totoloapa, Huitiupán, El Bosque, Pueblo Nuevo Solistahuacan, San Andrés Duraznal y Panthelo; aunque los tres primeros son los yacimientos principales (La Cueva del Ámbar de Chiapas, 2020).

Estos depósitos geológicos representan sedimentos de transición asociados con un entorno cercano a la costa, similar a un manglar. La característica más llamativa del ámbar de Chiapas es que muestra animales y plantas incrustados con delicados tejidos preservados casi intactos. El árbol productor de resina del ámbar de Chiapas está estrechamente relacionado con la leguminosa *Hymenaea courbaril*. Las poblaciones de esta planta crecen en condiciones naturales a lo largo de arroyos cercanos al litoral y afluentes de lagunas costeras bordeadas por manglares. (Riquelme et al., 2014).

En particular, el Municipio de Simojovel de Allende es considerado como *La Tierra del Ámbar*. Ya que en este municipio se produce el 90 % del total del ámbar que se extrae en el estado de Chiapas. Su principal fuente económica hasta los años 90s era la producción de café y de maíz. Después de 1990 la producción del café decayó, provocando el realce de la explotación del ámbar, convirtiéndola en la principal fuente económica en Simojovel de Allende (La Cueva del ámbar de Chiapas, 2020). Así mismo, se le asignó un nombre genérico a la variedad de ámbar que se encuentra en las diferentes localidades de Chiapas. El nombre asignado para este es *Simojovelita*, que tiene una variedad de colores que va del más común amarillo dorado, hasta el

amarillo cetrino, ocre anaranjado, rojo, café negruzco, amarillo lechoso, y raramente, verde y azul, vistos por refracción. (Riquelme et al. 2017).

Un dato interesante sobre esta localidad chiapaneca es que, en la antigüedad, los Pochtecas viajaban desde el centro de la república, donde se establecieron los mexicas, hasta Simojovel y hacían trueque con los Zinacantecas, que eran los que habían descubierto las minas de ámbar en esa zona. Este ámbar era llevado al gran mercado de Tenochtitlan y, al ser algo tan bello, los reyes, sacerdotes y guerreros lo utilizaban en accesorios como pectorales, brazaletes, anillos y orejeras (La Cueva del Ámbar de Chiapas, 2020).

3.5.1 Denominación de origen

En el año 2003 se creó la Norma Oficial Mexicana para la denominación de origen del Ámbar de Chiapas de acuerdo con la Ley de Metrología y Normalización. Sin embargo, por el número de pruebas que debía realizar un laboratorio para avalar la denominación de origen representaba un costo de 42 mil 500 pesos, dado que era necesario realizar 16 pruebas analíticas. Esto llevó a organizar una mesa de trabajo de las instituciones, empresarios y el sector ambarero para proponer una nueva versión de la Norma Oficial Mexicana que se publicó el 31 de mayo de 2021, la NOM-152-SCFI-2019, en la que se logró disminuir el número de pruebas a cuatro: infrarrojo, luz ultravioleta, solubilidad en etanol y dureza (La cueva del Ámbar de Chiapas, 2020). De modo que, un laboratorio que cuente con el equipo y acreditación necesarias para realizar las pruebas puede evaluar las piezas del ámbar y avalar la denominación de origen.

En esta norma se definió al ámbar como “resina vegetal fosilizada procedente de las exudaciones de diversas plantas, en México es producida por la especie de árbol llamada *Hymenaea courbaril*, leguminosa conocida como guapinol” (Diario Oficial de la Federación, 2021).

3.5.2 Consecuencias de usar la lámpara de luz ultravioleta

La luz UV es una parte de la energía radiante que proviene del sol y constituye la porción más energética del espectro electromagnético que incide en la superficie de la tierra. Sin embargo, este tipo de radiación es emitida por fuentes artificiales. Si la piel

de los mamíferos se somete a una exposición crónica de radiación UV, se inducen varias respuestas biológicas, por ejemplo: el desarrollo de eritema, edema, quemaduras de las células, hiperplasia, inmunosupresión, daño en el DNA, foto-envejecimiento y melanogénesis. Estas alteraciones pueden estar directa o indirectamente involucradas en el desarrollo de cáncer (González-Púmariega et al., 2009).

Las radiaciones UV de tipo B se encuentran entre las longitudes de onda de 280 nm a 320 nm y las menos energéticas son las de tipo A, con longitudes de onda de 320 nm a 400 nm. La radiación UVA se considera como la “radiación de envejecimiento” y es capaz de penetrar profundamente en la epidermis y en la dermis de la piel. Es más eficaz que la UVB en lograr un curtido de la piel inmediato que se produce por oscurecimiento de la melanina en la epidermis. La piel se puede quemar si es sometida a exposiciones intensas y prolongadas y hasta puede dañar las estructuras en el corion y causar foto-envejecimiento prematuro de la piel, así como elastosis solar. En estas zonas se pueden suprimir algunas funciones inmunológicas, y se pueden desencadenar procesos oxidativos. La lesión de UVA tiende a causar necrosis de las células endoteliales, dañando los vasos sanguíneos dérmicos. Dado que este tipo de radiación puede producir daño estructural al DNA y dañar el sistema inmunológico, puede llevar a la formación de cáncer (González-Púmariega et al., 2009).

3.6 Principios de técnicas analíticas

3.6.1 Espectroscopía de infrarrojo

La espectroscopia infrarroja, también conocida como FTIR o simplemente IR, estudia los fenómenos de interacción entre la radiación en la región de infrarrojo y la materia. Esencialmente, la energía de la radiación, localizada en determinada longitud de onda del infrarrojo, es absorbida por una molécula (o parte de ella) que se encuentra vibrando en su estado basal a la misma longitud de onda que la radiación infrarroja incidente, provocando con ello un cambio en la intensidad de la vibración (Mondragón, P. 2017).

El equipo donde se lleva a cabo la interacción entre la materia (muestra) y la radiación infrarroja es un espectrómetro de infrarrojo con ATR y el resultado de dicha interacción se lee en un espectro de infrarrojo. El espectro de infrarrojo es un esquema compuesto por bandas o señales, en donde en el eje de las abscisas están

representados todos los valores del intervalo de longitud de onda del infrarrojo medio, ya sea en número de onda (cm^{-1}) o de longitud de onda (nm). Mientras que en el eje de las ordenadas están representados los valores de la intensidad de absorción o transmisión. Cada pico en un espectro de infrarrojo representa un tipo específico de vibración. Por lo tanto, podemos decir que el espectro es una representación de los estados excitados producidos al hacer un barrido en todo el intervalo de longitudes de onda en el infrarrojo medio (Mondragón, P. 2017).

En la Tabla 1 se muestran la frecuencia, el grupo y tipo de vibración al que puede corresponder cada una de las bandas del espectro de referencia.

Tabla 1. Descripción del grupo y tipo de vibración de cada banda en el espectro de infrarrojo.

Frecuencia (cm^{-1})	Grupo	Tipo de vibración
2924-2921	Carbono e Hidrógeno saturados	Estiramiento asimétrico
2865-2852		Estiramiento simétrico
1727-1719	Ácidos carboxílicos	Estiramiento C=O
1702-1698	Aldehído Cetona	
1457-1455	Metilos (-CH ₃)	Torsión asimétrica
1384-1378		Torsión simétrica
1242-1238	Éster	Estiramiento asimétrico y simétrico (C-O-R)
1150-1136	Isopropilo (CH ₃) ₂ -CH-	Estiramiento (C-H)
1108-1104	Éter	Estiramiento asimétrico (R-O-R)
978-972	Vinilo (C=C)	Torsión C-H fuera de plano

La absorción más fuerte se debe a la presencia de carbono e hidrógeno saturado de 2926 cm^{-1} a 2853 cm^{-1} y 2962 cm^{-1} a 2872 cm^{-1} , de los que, el primero parece predominar y el segundo aparece menos evidente. Entre 1730 cm^{-1} y 1700 cm^{-1} está

presente el estiramiento de C=O característico de los ácidos carboxílicos, en algunos casos se observa un doblete. Por otra parte, alrededor de 1450 cm^{-1} y 1375 cm^{-1} se muestra la presencia de un gran número de metilos en el ámbar báltico, que son bandas de deformación C-H. La banda en 1240 cm^{-1} , aproximadamente, se debe a las vibraciones de estiramiento asimétrico y simétrico C-O-R, que podría ser por la presencia de acetato. La banda de 1150 cm^{-1} a 1130 cm^{-1} puede suponerse para el estiramiento C-H de un isopropilo y la de 1100 cm^{-1} para el estiramiento asimétrico R-O-R) de grupos alifáticos. Finalmente, la banda entre 970 cm^{-1} y 980 cm^{-1} , la cual puede estar acompañada por una banda aproximadamente en 1000 cm^{-1} , se debe a la torsión del enlace C-H (Angellini, I. & Bellintani, P., 2005) (Beck, C. et al. 1965).

3.6.2 Análisis Termogravimétrico

El análisis termogravimétrico es un método cuantitativo rápido para examinar el proceso general de pirólisis y estimar las tasas efectivas de todas las reacciones de descomposición (Ragazzi et al., 2003). Mide la disminución de la masa del sustrato causada por la liberación de volátiles durante la descomposición térmica (White et al., 2011). Es decir, se registra la pérdida de peso de una muestra en la medida en que se incrementa la temperatura, hasta temperaturas de $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, bajo condiciones controladas de velocidad de calentamiento y diferentes atmósferas de reacción; obteniéndose por esta vía las curvas denominadas TG o termogramas y las curvas de análisis termogravimétrico diferencial (DTG), que es la primera derivada de la curva TGA y es proporcional a la velocidad de descomposición de la muestra (Cutiño E. & Penedo, M. 2011).

Los termogramas obtenidos son característicos de un polímero o compuesto debido a la secuencia única de la reacción fisicoquímica. Esta se produce en rangos específicos de temperatura y velocidades de calentamiento siendo una función de la estructura molecular (Sandler et al., 1998). Estas reacciones se caracterizan por dos temperaturas, T_i y T_f , que se denominan temperatura de descomposición y temperatura final, respectivamente. La primera representa la temperatura más baja a la que se puede detectar el inicio de un cambio de masa. Y la segunda representa la temperatura

más baja a la que se ha completado el proceso responsable del cambio de masa (Hatakeyama, T. & Quinn, F.,1994).

Un punto importante es que el TGA no puede considerarse como una técnica de caja negra en la que se obtienen curvas de huellas dactilares, independientemente de las condiciones experimentales. Es decir, es esencial que para un análisis preciso se registren las condiciones experimentales y que, dentro de una serie dada de muestras, se estandaricen y mantengan las condiciones óptimas durante el transcurso de los experimentos. Solo entonces se pueden comparar las curvas TG de diferentes experimentos de manera significativa (Hatakeyama, T. & Quinn, F.,1994).

Una curva típica de TGA muestra la pérdida de masa frente a la temperatura y la relaciona con la pérdida de componentes volátiles, debido a la descomposición del polímero, combustión y residuos finales, permitiendo extraer conclusiones sobre los constituyentes individuales (Gómez, C. 2012). En general, las causas de pérdida de masa son: a) reacciones de descomposición, b) reacciones de oxidación, c) vaporización, d) sublimación, e) desorción (Figura 4. Curvas de TGA típicas y su interpretación (Gugliotta, M. ICTAC).Figura 4). Sin embargo, existen otros eventos térmicos que no provocan un cambio en la masa de la muestra, por ejemplo, fusión, cristalización o transición vítrea. (Hatakeyama, T. & Quinn, F.,1994).

En adición a esto, es posible trazar una curva de TG derivada para diferenciar reacciones superpuestas; estas son llamadas DTG, en donde se muestra el cambio de la masa respecto a la temperatura (dm/dT) y se puede graficar contra la temperatura o el tiempo. Para ser más específicos, observar un pico en la curva de DTG significa que la tasa de cambio de masa es máxima, es decir, que hubo una pérdida de masa significativa y por lo tanto una reacción. En cambio, para un intervalo de masa constante la dm/dT será cero (Hatakeyama, T. & Quinn, F.,1994).

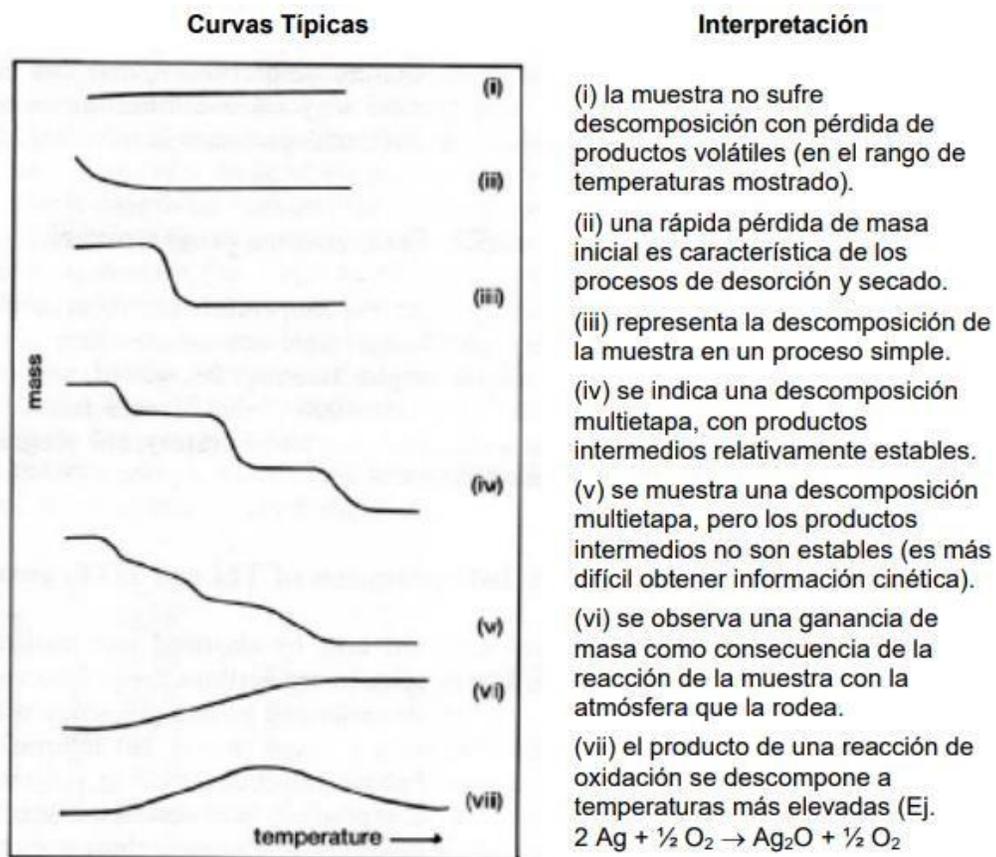


Figura 4. Curvas de TGA típicas y su interpretación (Gugliotta, M. ICTAC).

3.6.3 Calorimetría Diferencial de Barrido

Como muchas técnicas experimentales, el análisis TG no da un resultado inequívoco para cada fenómeno fisicoquímico encontrado. Sin embargo, el área de un pico en DSC se puede utilizar para estimar la entalpía de transición (ΔH), además de identificar las temperaturas de fusión o evaporación, que se muestran como un pico endotérmico y, de cristalización u oxidación que se observan como picos exotérmicos. Por otro lado, la transición vítrea se observa mediante DSC como un aumento escalonado en la capacidad calorífica de la muestra durante el calentamiento, debido a una mejora del movimiento molecular del polímero. Ésta la presentan los polímeros o las regiones amorfas de los polímeros parcialmente cristalinos, cuando un estado viscoso o gomoso se transforma en un estado duro, quebradizo y similar al vidrio (Figura 5) (Hatakeyama, T. & Quinn, F., 1994).

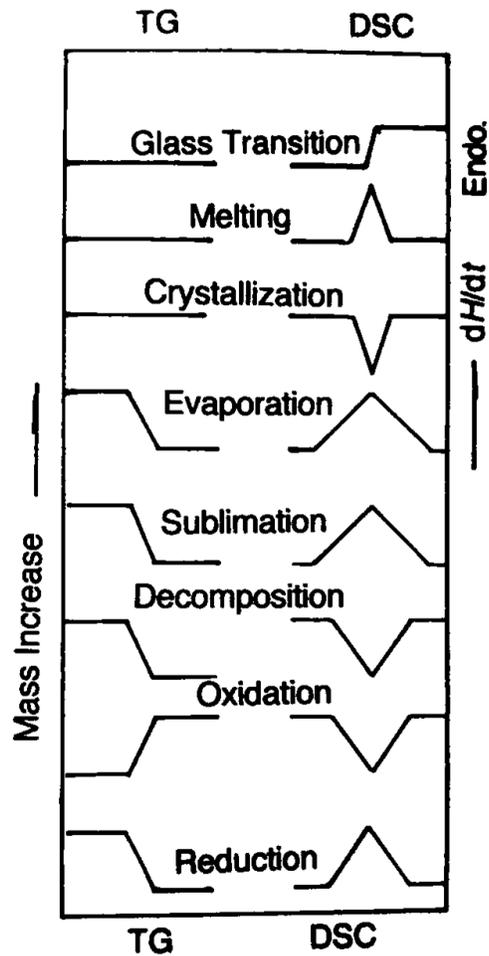


Figura 5. Esquema comparativo de curvas de TGA y DSC registradas para una variedad de procesos fisicoquímicos (Hatakeyama, T. & Quinn, F., 1994).

Tradicionalmente, con los sistemas de flujo de calor las endotermias se muestran como descendentes, ya que las transiciones endotérmicas dan como resultado un diferencial de temperatura negativo, mientras que con los sistemas de compensación de potencia se muestran como ascendentes, ya que con este principio las transiciones endotérmicas dan como resultado un aumento en la potencia suministrada a la muestra. En la Figura 5, las transiciones endotérmicas se muestran ascendentes (Gabbott, 2008).

4. JUSTIFICACIÓN

Hoy en día no se cuenta con el interés de adquirir conocimiento sobre la historia del ámbar en nuestro país, son contados los reportajes e investigaciones realizados con el fin de dar a conocer la importancia económica, cultural y social de esta resina fósil. Sin embargo, es trascendental destacar al ámbar como la única piedra preciosa de origen vegetal y con un gran potencial estético. Así mismo, reconocer el valioso trabajo de parte de los mineros, artesanos y comerciantes también agrega un valor al ámbar, sobre todo a los primeros, ya que la extracción es la parte más difícil y peligrosa de todo el proceso y es la que menos créditos se lleva.

Como parte de un esfuerzo para ese reconocimiento surgieron cambios a la normatividad aplicable, la NOM-152-SCFI-2019, publicada en el Diario Oficial de la Federación, en la cual se describen las especificaciones, métodos de prueba y evaluación de la conformidad que debe cumplir el ámbar de Chiapas desde su extracción y transformación física, hasta su comercialización.

Se tomó la decisión de iniciar el estudio del ámbar realizando las pruebas contenidas en la norma, además de evaluar la repetibilidad y la reproducibilidad de los procedimientos, así como determinar si se obtenían los resultados especificados, para posteriormente, conseguir la acreditación por la Unidad de Metrología, de la Facultad de Química de la UNAM, y que pueda fungir como laboratorio evaluador de piezas que requieran la denominación de origen del ámbar de Chiapas, ya que hasta la fecha no existe ninguno. Sin embargo, en el proceso se observó que los resultados obtenidos de las pruebas normadas para identificar el origen de las muestras de ámbar eran insuficientes; lo anterior nos llevó a complementar la caracterización del ámbar con otras pruebas como la identificación visual, la estática y la densidad; además del TGA y el DSC.

El hecho de que aún no exista un laboratorio para certificar la denominación de origen del ámbar puede deberse a un conjunto de factores como: la necesidad de tener equipos de alto costo, por ejemplo, un espectrómetro de infrarrojo, una balanza calibrada, un horno y material básico de laboratorio; además de personal calificado para llevar a cabo las pruebas y dictaminar el resultado de una muestra problema lo que lo

vuelve de difícil acceso para los artesanos y comerciantes que se interesen en conocer la autenticidad del ámbar que trabajan. Y, por otro lado, está la parte del retorno sobre la inversión, se requiere de una cantidad de pruebas que justifique la implementación de este proceso.

Es necesario tener presente que aún con la certificación del ámbar, la presencia de las falsificaciones permanecerá en el mercado. Y, por tanto, además, se requiere de un trabajo de concientización sobre la adquisición de piezas evaluadas y el comercio justo.

Otro punto importante es que el ámbar puede adquirir un valor agregado si se encuentran inclusiones en él, ya que el descubrimiento de organismos, plantas y sedimentos conservados en esta resina, con la posibilidad de que tengan millones de años de antigüedad, abre el paso a diversas investigaciones que permiten hacer la reconstrucción de ecosistemas, la preservación de especies y el estudio de la evolución y sus interacciones ecológicas, por lo que es primordial asegurar la autenticidad del ámbar.

5. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

5.1 Objetivo general

Realizar las pruebas establecidas en la NOM-152-SCFI-2019 para identificar si una pieza comercializada como ámbar lo es o no.

5.2 Objetivos específicos

Determinar las pruebas que permitan contribuir a la denominación del origen del ámbar de Chiapas.

Aportar pruebas adicionales factibles para la identificación de falsificaciones de ámbar.

5.3 Hipótesis

Al realizar las pruebas establecidas en la NOM-152-SCFI-2019 a distintas muestras comercializadas como ámbar, será posible diferenciar al ámbar de cualquier falsificación y adicionalmente se podrá asegurar que el lugar de origen de la muestra es Chiapas.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

Se identificaron las muestras de ámbar (Amb), copal (Cop) y falsificación (Fals) asignándoles un número interno y una descripción breve:

Amb-01: Pieza color amarillo claro obtenida del Municipio de Simojovel, Chiapas.

Amb-02: Pieza color verde oscuro obtenida del Municipio de Simojovel, Chiapas.

Amb-03: Pieza color café-amarillo (comercializada como pieza verde) obtenida de República Dominicana.

Amb-04: Pieza color amarillo claro pulida obtenida de Chiapas.

Amb-05: Pieza color amarillo lechoso obtenida de la región Báltica.

Amb-06: Pieza color amarillo oscuro obtenida de la localidad Estrella de Belén ubicada en el Municipio Palenque, Chiapas.

Amb-07: Pieza color amarillo claro en bruto obtenida del Municipio de Simojovel, Chiapas.

Amb-08: Pieza color amarillo claro en bruto obtenida del Municipio de Simojovel, Chiapas.

Cop-01: Copal blanco obtenido de un comercio en CDMX.

Cop-02: Copal negro obtenido de un comercio en CDMX.

Fals-01: Pieza de joyería falsificada de poli (metacrilato de metilo) vendida como ámbar.

Fals-02: Pieza de plástico de color amarillo.

6.1 Pruebas normadas

6.1.1 Infrarrojo

Los espectrómetros de infrarrojo utilizados fueron: (1) Thermo Scientific Nicolet 6700 FT-IR, en el cual se utilizó una película de poliestireno No. ADP 9934 para hacer la verificación intermedia del equipo y las condiciones de análisis que se establecieron fueron 16 escaneos y resolución de 8 cm^{-1} , en este IR se analizaron las muestras Amb-01, Amb-02, Amb-03, Cop-01 y Cop-02. El otro IR que se utilizó fue el (2) Thermo

Scientific Nicolet 6700 FT-IR, No. Inventario NZ02297212, las condiciones de análisis que se establecieron fueron 32 escaneos y 8 cm^{-1} de resolución, se analizaron las muestras Amb-05, Amb-06, Amb-07 y Amb-08. Ambos equipos analizaron las muestras mediante la técnica de Reflectancia Totalmente Atenuada, ATR, con cristal de diamante, y el software OMNIC.

Las muestras Amb-01, Amb-02 y Amb-03 se limpiaron con paños para IR y la muestra Cop-01 se dejó en un desecador usando sílica como desecante durante 72 horas antes de hacer la medición.

Para hacer las mediciones de las muestras Amb-01, Amb-02 y Amb-03 se probaron tres formas: la primera con piezas cortadas a 1 mm de grosor, con una cortadora IsoMet 1000 PRECISION SAW y un disco de corte de diamante; la segunda con muestras pulverizadas con una segueta de calar TRUPER; y la tercera combinando piezas cortadas con polvo, donde resultaron bandas mejor definidas al hacer las mediciones con ámbar en polvo. Por otro lado, para las mediciones de las muestras restantes se utilizó únicamente el polvo.

Para las muestras Amb-01, Amb-02 y Amb-03 se hicieron 10 mediciones. Para las muestras Cop-01 y Cop-02, así como de las combinaciones (imitaciones hechas de ámbar y copal) se realizaron solo 5 mediciones. Y para las muestras Amb-05, Amb-06, Amb-07 y Amb-08 solo se realizó una medición.

Para el cálculo de la incertidumbre combinada (u_c) de las mediciones se tomaron como fuentes de incertidumbre la resolución del equipo, la incertidumbre reportada en el informe de calibración y la repetibilidad. Cabe mencionar que solo se estimó la incertidumbre para las mediciones de las muestras Amb-01, Amb-02, Amb-03, Cop-01 y Cop-02, ya que para ellas se cuenta con la información del estado metrológico del instrumento, y se hicieron al menos 5 mediciones, el resto de las muestras se analizaron en un equipo diferente del que no se tiene información del estado metrológico del instrumento y, solo se realizó una medición por muestra.

Como coeficiente de sensibilidad, se calculó el cociente de la desviación estándar entre el promedio de las mediciones, multiplicado por 100, como se muestra

en la ecuación 1. Finalmente, para obtener la incertidumbre expandida (U) se utilizó la ecuación 2.

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{res}{\sqrt{12}} * \frac{s}{x} * 100\right)^2 + \left(\frac{U_{IC}}{2} * \frac{s}{x} * 100\right)^2 + \left(\frac{s}{\sqrt{n}} * \frac{s}{x} * 100\right)^2} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

res= resolución del equipo

s= desviación estándar

x= promedio de las mediciones

U_{IC}= Incertidumbre reportada en el informe de calibración

n= número de mediciones

$$U = u_c * k \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

u_c= incertidumbre combinada

k= factor de cobertura, se considera una distribución *t* de Student en el que para el 95.45 % de confianza se asume k = 2.

6.1.2 Comportamiento con la luz ultravioleta (UV)

Para esta prueba es necesario contar con una lámpara de luz ultravioleta con dos longitudes de onda disponibles, tanto de onda larga como de onda corta. En nuestro caso se utilizó una lámpara SPECTROLINE®, modelo ENF-240C y No. de serie 189253, que disponía de la longitud de onda larga (366 nm) y la longitud de onda corta (254 nm).

Se debe ver el reflejo de las muestras al incidir la luz ultravioleta sobre ellas, ya que estas se excitan al interaccionar con la luz y se ve el color en el cual emiten. De acuerdo con la norma, al incidir la luz con longitud de onda corta no se observa un cambio

aparente en el ámbar o es mínimo. En cambio, con la luz de onda larga, las moléculas del ámbar se excitan y emiten un color azul blanquecino. Este experimento se debe realizar por triplicado.

Cabe aclarar que el ámbar debe estar pulido o cortado para poder emitir color, ya que se puede generar en su superficie una capa de material oxidado que no es capaz de excitarse, o bien no permite que la muestra en su interior se excite con la radiación ultravioleta, quizá también a la presencia de material como el polvo, restos de tierra o piedras que estén adheridas al Ámbar (Diario Oficial de la Federación [NOM-152-SCFI-2019], 2021).

6.1.3 Solubilidad en etanol

Se utilizó una estufa Binder 11-13445 a 110 °C. Se llevaron a peso constante tres pesafiltros por cada una de las muestras: Amb-01, Amb-02, Amb-03, Amb-05, Amb-06, Amb-07, Amb-08, Cop-01, Cop-02 y Fals-01; de las cuales se utilizaron 100 mg pulverizados o en su caso en trozos muy pequeños. Las pesadas se realizaron en dos balanzas: Una Sartorius BP 210 S con $d = 0.1$ mg, para un alcance de 210 g y una Mettler Toledo $d = 0.01$ mg/ 0.1 mg, para un alcance de 41 g/ 120 g; ambas calibradas y trazadas al Patrón Nacional de Masa No. 21. Así mismo, por cada lectura de masa se tomó registro de las condiciones ambientales: presión (hPa), temperatura (°C) y humedad relativa (% HR).

Se considera peso constante cuando la diferencia de dos pesadas sucesivas no exceda de 0.0003 g. Normalmente, el tiempo necesario para obtener el peso constante es de una hora, ya que se deja el pesafiltro en la estufa 30 min; en nuestro caso a 110 °C, y después se deja temperar en un desecador por otros 30 min, para posteriormente pesar.

Cada muestra se cubrió con 1 mL de etanol grado reactivo lote M09C66, marca J.T. Baker. Las muestras reposaron en condiciones ambientales durante 15 minutos para verificar si había alguna pérdida del volumen. Después se llevaron a sequedad en un desecador por al menos 12 horas. Finalmente, los pesafiltros se llevaron a peso constante y se determinó si las muestras presentaban diferencias de peso mayores al 5 %, con la ecuación 3.

$$\% m_{recuperada} = \frac{m_{2\ pf\ final} - m_{2\ pf\ inicial}}{m_m} * 100\% \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

$\% m_{recuperada}$ = porcentaje de masa insoluble recuperada

$m_{2\ pf\ final}$ = masa constante del pesafiltros con muestra (g)

$m_{2\ pf\ inicial}$ = masa constante del pesafiltros vacío (g)

m_m = masa de la muestra (g)

Al derivar el modelo matemático mostrado en la ecuación 3, respecto a cada parámetro, se obtienen los siguientes coeficientes de sensibilidad:

$$\frac{\delta \% m_{recuperada}}{\delta m_{pf\ inicial}} = \frac{-100}{m_m} \quad \text{Ec. 4}$$

$$\frac{\delta \% m_{recuperada}}{\delta m_{muestra}} = \frac{-100 * (m_{pf\ final} - m_{pf\ inicial})}{m_m^2} \quad \text{Ec. 5}$$

$$\frac{\delta \% m_{recuperada}}{\delta m_{pf\ final}} = \frac{100}{m_m} \quad \text{Ec. 6}$$

Con los cuales es posible calcular la incertidumbre combinada (u_c) con la ecuación 7.

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{res_{balanza}}{\sqrt{n}} * \frac{-100}{m_m}\right)^2 + \left(\frac{U_{IC}}{k} * \frac{-100}{m_m}\right)^2 + \left(\frac{s_{pf\ inicial}}{\sqrt{n_2}} * \frac{-100}{m_m}\right)^2 + \left(\frac{res_{balanza}}{\sqrt{n}} * \frac{-100 * (m_{pf\ final} - m_{pf\ inicial})}{m_m^2}\right)^2 + \left(\frac{U_{IC}}{k} * \frac{-100 * (m_{pf\ final} - m_{pf\ inicial})}{m_m^2}\right)^2 + \left(\frac{s_{muestr}}{\sqrt{n_2}} * \frac{-100 * (m_{pf\ final} - m_{pf\ inicial})}{m_m^2}\right)^2 + \left(\frac{res_{balanza}}{\sqrt{n}} * \frac{100}{m_m}\right)^2 + \left(\frac{U_{IC}}{k} * \frac{100}{m_m}\right)^2 + \left(\frac{s_{pf\ final}}{\sqrt{n_2}} * \frac{100}{m_m}\right)^2} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

$res_{balanza}$ = resolución de la balanza

U_{IC} = incertidumbre expandida del informe de calibración de acuerdo con el valor nominal de la carga

$s_{pf\ inicial}$ = desviación estándar de las mediciones del pesafiltros vacío

$s_{pf\ final}$ = desviación estándar de las mediciones del pesafiltros después de la evaporación de EtOH

$s_{muestra}$ = desviación estándar de las mediciones de la muestra

m_m = masa de la muestra

$m_{pf\ inicial}$ = masa del pesafiltros vacío

$m_{pf\ final}$ = masa del pesafiltros después de la evaporación de EtOH

$n = 12$ debido a la distribución rectangular

n_2 = número de mediciones realizadas

k = factor de cobertura especificado en el informe de calibración de la balanza

6.1.4 Dureza Shore D

Se utilizó un durómetro digital Shore D marca GRAIGAR modelo LX-D-Y, con una resolución de 0.5 HD y alcance de 0-100. La NOM establece que, para la prueba de dureza, el ámbar debe cumplir con un valor de $(86 \pm 5) \%$. Sobre este análisis de primera instancia fue complicado obtener resultados homogéneos, debido a que la fuerza ejercida por el usuario es aleatoria y eso tiene un impacto directo sobre la medición y por ende mayor dispersión. Entonces como parte del tratamiento de la muestra se pulieron fragmentos de cada pieza hasta obtener caras planas y con la finalidad de mejorar la reproducibilidad de esta prueba se propuso encapsular la muestra en una resina, para lo cual utilizamos poliéster; el objetivo fue darle estabilidad a la pieza y por lo tanto a la medición. Además, para saber si la prueba nos permite diferenciar entre una pieza de ámbar y las dos falsificaciones, una pieza hecha de poli (metacrilato de metilo) dopado con europio (Fals-02) y otra comercializada como ámbar (Fals-01).

Se realizaron 10 mediciones para las muestras Amb-01, Amb-02, Amb-03, Amb-05, Amb-06, Amb-07, Amb-08, Fals-01 y Fals-02. En las muestras Cop-01 y Cop-02 no fue posible obtener resultados confiables de la prueba de dureza ya que, al ser una resina sin endurecer no se ejerce la misma fuerza sobre la punta del durómetro, resultando en

lecturas dispersas y, por otro lado, al tener una consistencia pegajosa quedaba una capa del material en la punta del instrumento.

Se calculó el promedio y desviación estándar de las mediciones, así como también la incertidumbre estándar (u), con la ecuación 8, e incertidumbre expandida (U) con la ecuación 9.

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

s : desviación estándar

n : número de mediciones

$$U = u * k \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

u : incertidumbre estándar

k : % de confianza (95%; $k=2$)

6.2 Pruebas complementarias

6.2.1 Identificación visual y sensorial

Entre estos aspectos se calificó que el color de la pieza estuviera dentro de la clasificación de la NOM-152-SCFI-2019 que incluyen: amarillo, rojo, verde, negro, blanco y café; cada uno en diferentes tonos. También se observó la apariencia, es decir, si la pieza se podía pulverizar, o solo se podían obtener trozos de ella. Otro rubro evaluado fue la heterogeneidad en el interior del ámbar, que, al ser formaciones de la naturaleza, es única en cada pieza. Algunas tienen inclusiones de organismos, tierra o capas de diferentes tonalidades. Por el contrario, las piezas falsas suelen ser homogéneas, es decir, de un solo tono y sin imperfecciones. El otro aspecto que se calificó fue la textura, que puede ser lisa, rugosa o áspera y esto depende del tratamiento por el que haya pasado la pieza. Y, finalmente, la sensación térmica, ya

que las piezas falsas están hechas con vidrio o polímeros sintéticos y se perciben frías, mientras que el ámbar se percibe cálido o no se logra apreciar una diferencia de temperatura.

6.2.2 Fuerza Electroestática

Para esta prueba primero se carga electrostáticamente la pieza de ámbar por frotación con un tejido de lana. Después, se acerca a las láminas de un electroscopio analógico, que tienen cargas de igual signo, éstas se separan por repulsión electrostática y el ángulo de separación depende de la carga que se haya acumulado. Se registró como resultado positivo observar un cambio en el ángulo de las agujas del electroscopio y negativo si no había movimiento.

En el caso del ámbar en bruto fue necesario retirar los restos de tierra o sedimentos en al menos una parte de la pieza, esto con la finalidad de disminuir las interferencias entre el ámbar y la tela al frotarlos, además de evitar falsos negativos. Se realizaron 10 mediciones de cada una de las muestras: Amb-01, Amb-02, Amb-03, Amb-05, Amb-06, Amb-07, Amb-08, Cop-01, Cop-02 y Fals-01.

6.2.3 Densidad

Debido a que el ámbar presenta una densidad teórica de $(1.05 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1} - 1.10 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1})$ y que las falsificaciones que suelen ser de vidrio tienen una densidad reportada de $(2.5 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1} - 2.6 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1})$ son más densas, se decidió determinar la densidad de cada una de las piezas evaluadas. Esto se realizó por gravimetría con dos métodos: con un picnómetro y con un aditamento de densidad para un IPFNA.

Debido a que no se cuenta con un criterio de aceptación en la normatividad aplicable para la evaluación de la densidad, ni para la comparación de métodos, los valores obtenidos serán reportados como tal, con su respectiva desviación estándar e incertidumbre. Sin embargo, es importante considerar que para el método con el picnómetro se cuenta con un informe de calibración de la balanza y del picnómetro, así como también que se tomaron registros de la temperatura del agua y condiciones ambientales y, por otro lado, con el método del aditamento de densidad para la balanza

no se cuenta con ningún informe de calibración para la parte de la densidad, así como tampoco hubo monitoreo de la temperatura del agua y condiciones ambientales.

6.2.3.1 Densidad con un picnómetro

Se utilizó un IPFNA, clase especial I, con resolución de 0.1 mg, y un picnómetro Gay Lussac calibrados, agua desionizada y una muestra de cada pieza de 0.5 cm x 0.5 cm, aproximadamente.

Se tomó registro de: (1) la masa del picnómetro vacío, (2) la masa del picnómetro con agua y (3) la masa del picnómetro con la muestra y con agua. Se realizaron 10 lecturas de cada parámetro para cada una de las muestras, además se tomó registro de las condiciones ambientales iniciales y finales: presión (hPa), temperatura del aire y del agua (°C) y humedad relativa (% HR). Las muestras sometidas a esta prueba fueron Amb-01, Amb-02, Amb-03, Amb-04, Amb-05, Amb-06, Amb-07, Amb-08, Cop-01, Cop-02 y Fals-01.

Antes de realizar los cálculos necesarios, se analizaron los resultados con una prueba de Grubbs para los diez datos de cada medición, con la finalidad de saber si había algún dato aberrante entre los resultados obtenidos, después de aplicar la herramienta estadística quedaron ocho datos para cada muestra, con los cuales se obtuvo un promedio para calcular la densidad relativa (DR) de cada muestra con la ecuación 10.

$$DR = \frac{m_{\text{ámbar}} - m_{\text{pic}}}{m_{\text{agua}} - m_{\text{pic}}} = \frac{m_{\text{pic}+H2O+\text{ámbar}} - m_{\text{pic vacío}}}{m_{\text{pic}+agua} - m_{\text{pic vacío}}} \quad \text{Ec.10}$$

Derivando la ecuación anterior respecto a cada parámetro evaluado, se obtienen los siguientes coeficientes de sensibilidad, con los cuales es posible calcular la incertidumbre combinada (u_c) con la ecuación 14:

$$\frac{\delta DR}{\delta m_{\text{pic}}} = \frac{m_{\text{pic}+H2O+\text{ámbar}} - m_{\text{pic}+agua}}{(m_{\text{pic}+agua} - m_{\text{pic vacío}})^2} \quad \text{Ec. 11}$$

$$\frac{\delta DR}{\delta m_{\text{pic}+agua}} = -\frac{m_{\text{pic}+H2O+\text{ámbar}} - m_{\text{pic vacío}}}{(m_{\text{pic}+agua} - m_{\text{pic vacío}})^2} \quad \text{Ec. 12}$$

$$\frac{\delta DR}{\delta m_{pic+H2O+\acute{a}mbar}} = \frac{1}{m_{pic+agua} - m_{pic\ vacio}} \quad \text{Ec. 13}$$

$$u_c = \sqrt{\frac{res_{balanza}^2}{\sqrt{n}} * \frac{m_{pic+H2O+\acute{a}mbar} - m_{pic+agua}}{(m_{pic+agua} - m_{pic\ vacio})^2} + \left(\frac{U_C}{k} * \frac{m_{pic+H2O+\acute{a}mbar} - m_{pic+agua}}{(m_{pic+agua} - m_{pic\ vacio})^2}\right)^2 + \left(\frac{S_{pic\ vacio}}{\sqrt{n_2}} * \frac{m_{pic+H2O+\acute{a}mbar} - m_{pic+agua}}{(m_{pic+agua} - m_{pic\ vacio})^2}\right)^2 + \left(\frac{res_{balanza}}{\sqrt{n}} * -\frac{m_{pic+H2O+\acute{a}mbar} - m_{pic\ vacio}}{(m_{pic+agua} - m_{pic\ vacio})^2}\right)^2 + \left(\frac{U_{IC}}{k} * -\frac{m_{pic+H2O+\acute{a}mbar} - m_{pic\ vacio}}{(m_{pic+agua} - m_{pic\ vacio})^2}\right)^2 + \left(\frac{S_{pic+agua}}{\sqrt{n_2}} * -\frac{m_{pic+H2O+\acute{a}mbar} - m_{pic\ vacio}}{(m_{pic+agua} - m_{pic\ vacio})^2}\right)^2 + \left(\frac{res_{balanza}}{\sqrt{n}} * \frac{1}{m_{pic+agua} - m_{pic\ vacio}}\right)^2 + \left(\frac{U_{IC}}{k} * \frac{1}{m_{pic+agua} - m_{pic\ vacio}}\right)^2 + \left(\frac{S_{pic+agua+\acute{a}mbar}}{\sqrt{n_2}} * \frac{1}{m_{pic+agua} - m_{pic\ vacio}}\right)^2} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

$res_{balanza}$ = resolución de la balanza analítica

U_{IC} = incertidumbre expandida del informe de calibración de acuerdo con el valor nominal de la carga

$S_{pic\ vacio}$ = desviación estándar de las mediciones del picnómetro vacío

$S_{pic+agua}$ = desviación estándar de las mediciones del picnómetro con agua

$S_{pic+agua+\acute{a}mbar}$ = desviación estándar de las mediciones del picnómetro con agua y con la muestra de ámbar

$m_{pic\ vacio}$ = masa del picnómetro vacío

$m_{pic+agua}$ = masa del picnómetro con agua

$m_{pic+agua+\acute{a}mbar}$ = masa del picnómetro con agua y con la muestra de ámbar

$n = 12$ debido a la distribución rectangular

n_2 = número de mediciones realizadas

k = factor de cobertura especificado en el informe de calibración de la balanza

Y de la misma manera se calculó la incertidumbre expandida con un factor de cobertura de 2 con la ecuación 2.

Posteriormente, con la ecuación 15 se calculó la densidad del agua (ρ_{agua}) a 20 °C.

$$\rho_{\text{agua}} = a_5 \left[1 - \frac{(t+a_1)^2 \cdot (t+a_2)}{a_3 \cdot (t+a_4)} \right] + C_{mpA} \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

$t / ^\circ\text{C}$ = Temperatura del agua

$$a_1 / ^\circ\text{C} = -3.983035 \pm 0.00067$$

$$a_2 / ^\circ\text{C} = 301.797$$

$$a_3 / ^\circ\text{C}^2 = 522528.9$$

$$a_4 / ^\circ\text{C} = 69.34881$$

$$a_5 / (\text{kg m}^{-3}) = 999.974950 \pm 0.00084$$

$$C_{mpA} / (\text{kg m}^{-3})$$

Corrección por modelo matemático para el cálculo de la densidad del agua. Es importante considerar que, el valor estimado de esta variable aleatoria es cero, pero no su incertidumbre.

$$u_{\rho' \text{ agua}} = \sqrt{u_{\rho \text{ agua}}^2 + u_s^2} \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

$u_{\rho' \text{ agua}}$ = incertidumbre de la densidad del agua estimada mediante la fórmula CCM que incluye una incertidumbre debido a la estabilidad.

$u_{\rho \text{ agua}}$ = incertidumbre estándar de la densidad del agua obtenida con la fórmula del CCM ($1.7 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

u_s = incertidumbre adicional debida a la falta de estabilidad de la densidad del agua ($2.9 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $k=1$)

Y finalmente, para calcular la densidad del ámbar ($\rho_{\text{ámbar}}$) se utilizó la ecuación 17, asimismo, la incertidumbre combinada se calculó con la ecuación 18.

$$\rho_{\text{ámbar}} = DR * \rho_{\text{agua}} \quad \text{Ec. 17}$$

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{u_{DR \text{ ámbar}}}{2} * 1\right)^2 + \left(u_{\rho' \text{ agua}} * 1\right)^2} \quad \text{Ec. 18}$$

6.2.3.2 Densidad con un kit para densidad para IPFNA

Para este método se utilizó un kit para densidad que se puede acoplar a un IPFNA, clase especial I, con resolución de 0.01 mg calibrada. Se utilizó la técnica de empuje que usa el principio de Arquímedes, el cual afirma que: un cuerpo sumergido en un fluido manifiesta una pérdida de peso aparente igual al peso del fluido que desplaza. El sólido se pesa en un plato que se encuentra en contacto con el aire y, después, se pesa en una rejilla sumergida en el líquido auxiliar con una densidad conocida, como el agua. Al final, el instrumento genera el valor de densidad para cada determinación. Sin embargo, también es posible determinarla con la ecuación 19, los términos que se toman en cuenta para confirmar el principio de Arquímedes son la masa del ámbar en contacto con el aire, la masa del ámbar sumergida en el líquido y las densidades tanto del líquido como del aire.

$$\rho_{\text{ámbar}} = \left[\frac{m_{\text{ámbar aire}}}{m_{\text{ámbar aire}} - m_{\text{ámbar líquido}}} \right] * \rho_{\text{líquido}} - \rho_{\text{aire}} + \rho_{\text{aire}} \quad \text{Ec. 19}$$

Se obtuvieron 10 fragmentos de las muestras Amb-01 y Amb-02 los cuales se midieron una vez cada uno, además, se obtuvieron 3 fragmentos de la muestra Amb-03 y 5 fragmentos de la muestra Amb-04 a los cuales se les determinó la densidad en repetidas ocasiones hasta obtener las 10 mediciones. Posteriormente se calculó el promedio, desviación estándar, incertidumbre estándar (u), con la ecuación 8, e incertidumbre expandida (U), con la ecuación 9.

6.2.4 Análisis termogravimétrico

Se utilizó un equipo de TGA Q5000 V3.17 Build 265, con una resolución de 0.1 μg , un rango de temperatura de temperatura ambiente y hasta 1000 $^{\circ}\text{C}$, una velocidad de calentamiento de (0.1 a 100) $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ y el software Advantage/ Universal V4.5A TA Instruments para leer los termogramas. Este equipo consta de una microbalanza electrónica, un horno y sensores de temperatura, un termopar, un programador de temperatura, un controlador de atmósfera y fuentes de entrada de nitrógeno, aire y helio de alta pureza.

La temperatura del horno fue en aumento desde 20 $^{\circ}\text{C}$ hasta 600 $^{\circ}\text{C}$, a una velocidad de 10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, con una atmósfera de N_2 . Se analizaron las siguientes muestras pulverizadas; entre paréntesis sus respectivas masas: Amb-01(4.7550 mg), Amb-02 (3.0850 mg), Amb-03 (1.4600 mg), Amb-05 (2.2190 mg), Amb-06 (2.9060 mg), Amb-07 (2.0350 mg), Amb-08 (2.8300 mg), Cop-01(3.6510 mg) y Fals-01 (16.3030 mg).

6.2.5 Calorimetría Diferencial de Barrido

El equipo utilizado para el análisis por DSC fue de la Marca Mettler Toledo, que maneja un intervalo de temperatura de -150 $^{\circ}\text{C}$ a 700 $^{\circ}\text{C}$, una velocidad de calentamiento de (0.02 a 300) $\text{K}\cdot\text{min}^{-1}$ y tiene un sensor FRS 5 con 56 termopares, al cual se le hacen verificaciones intermedias con un MRC de indio al 99.999 %, con No. de lote WE 13000, además, se utiliza ácido benzoico como muestra control, con No. de lote BBCJ5362 y con trazabilidad un estándar primario.

Se realizó un experimento previo para identificar los cambios fisicoquímicos que pudieran presentar las muestras, esto en forma de ciclo. Es decir, se realizó una primera corrida, en donde se llevó la temperatura desde - 50 $^{\circ}\text{C}$ hasta 175 $^{\circ}\text{C}$, después se dejó enfriar y se realizó una segunda corrida de -50 $^{\circ}\text{C}$ a 150 $^{\circ}\text{C}$. Ambas corridas con rampa de calentamiento de 10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ con nitrógeno como gas de purga.

Posteriormente se realizó otro análisis llevando la temperatura de 25 $^{\circ}\text{C}$ a -50 $^{\circ}\text{C}$ y después se elevó a 500 $^{\circ}\text{C}$, con rampa de calentamiento de 10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ con nitrógeno como gas de purga.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Pruebas normadas

7.1.1 Infrarrojo

Los resultados de los análisis por espectroscopía infrarroja para las muestras de tres regiones distintas (Chiapas, República Dominicana y el Báltico) así como de las muestras de copal, se encuentran en la Tabla 2, comparando los valores de número de onda experimentales con los reportados en la NOM-152-SCFI-2019, así como sus respectivas incertidumbres expandidas. Por lo descrito en el punto 6.1.1, solo se reportan las incertidumbres de las muestras Amb-01, Amb-02, Amb-03, Cop-01 y Cop-02.

Tabla 2. Resultados de la prueba de ATR FT-IR para muestras de ámbar de 3 regiones distintas y dos falsificaciones.

Referencia	Amb-02		Amb-03		Amb-05		Cop-01		Cop-02	
	bandas obtenidas (cm ⁻¹)	U k=2	bandas obtenidas (cm ⁻¹)	U k=2	bandas obtenidas (cm ⁻¹)	U k=2	bandas obtenidas (cm ⁻¹)	U k=2	bandas obtenidas (cm ⁻¹)	U k=2
NOM-152-SCFI-2019 (cm ⁻¹)										
2924-2921	2924.05	0.11	2925.98	0.10	2921.8	-	2927.79	0.12	2932.64	0.21
2865-2852	2864.29	0.16	2865.58	0.28	2864.9	-	2875.92	0.61	2867.97	0.15
1727-1719	1728.55	1.53	1724.69	0.30	1732.3	-	1727.44	-	-	-
1702-1698	1703.18	0.41	1696.62	0.81	1712.5	-	1695.33	-	1701.51	-
1457-1455	1457.03	0.98	1454.79	2.43	1448.6	-	1468.10	0.93	1456.24	0.45
1384-1378	1379.14	0.74	1382.04	0.59	1373.8	-	1384.13	0.08	1383.14	1.70
1242-1238	1241.06	0.50	1240.36	0.34	1238.0	-	-	-	1243.81	0.22
1150-1136	1144.42	0.37	1143.80	0.52	1155.4	-	-	-	-	-
1108-1104	1105.86	0.38	1103.84	0.15	-	-	-	-	-	-
978-972	975.62	0.45	-	-	978.9	-	-	-	989.34	0.36

Los resultados, en negritas, son las bandas obtenidas en los espectros de infrarrojo que no están dentro del intervalo que se establece en la Tabla B.1 de la NOM-152-SCFI-2019. Así mismo, en las Figuras 6, 7 y 8 se muestran los espectros obtenidos para las

muestras de ámbar de las diferentes regiones y, en la Figura 10 uno de los espectros de la muestra falsa que es el copal negro.

Examinando los espectros de infrarrojo del ámbar para tres regiones (Chiapas, República Dominicana y el Báltico), las diferencias más notables se observan en el porcentaje de transmitancia, que se traduce en la cantidad de radiación o energía que atraviesa un cuerpo: a mayor transmitancia, es mayor la energía que atraviesa la muestra, es decir, que absorbe poca energía. Comparando las bandas espectrales más notables que son los dobletes entre 2920 cm^{-1} a 2950 cm^{-1} y 1725 cm^{-1} a 1720 cm^{-1} : la muestra de Chiapas Amb-02 (Figura 6) presenta mayor porcentaje de transmitancia con valores de 84 % y 91 %, después la muestra dominicana Amb-03 (Figura 7) muestra las señales en una transmitancia del 72 % y 76 %, respectivamente y, la muestra del báltico Amb-05 (Figura 8), presenta los menores porcentajes de transmitancia, que son en 67 % y 71 %, lo que es utilidad para establecer una primera diferencia respecto al origen de las piezas.

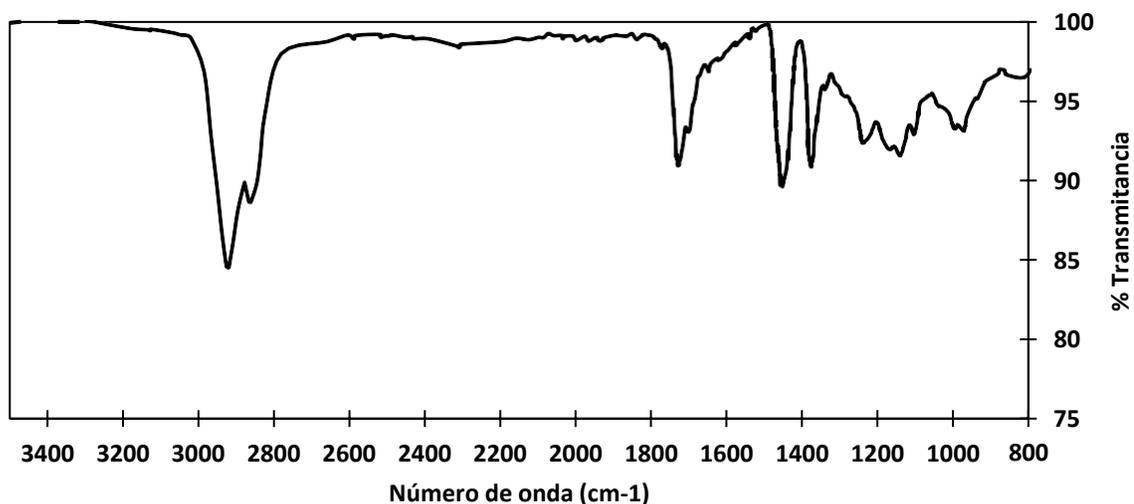


Figura 6. Espectro de infrarrojo de la muestra Amb-02.

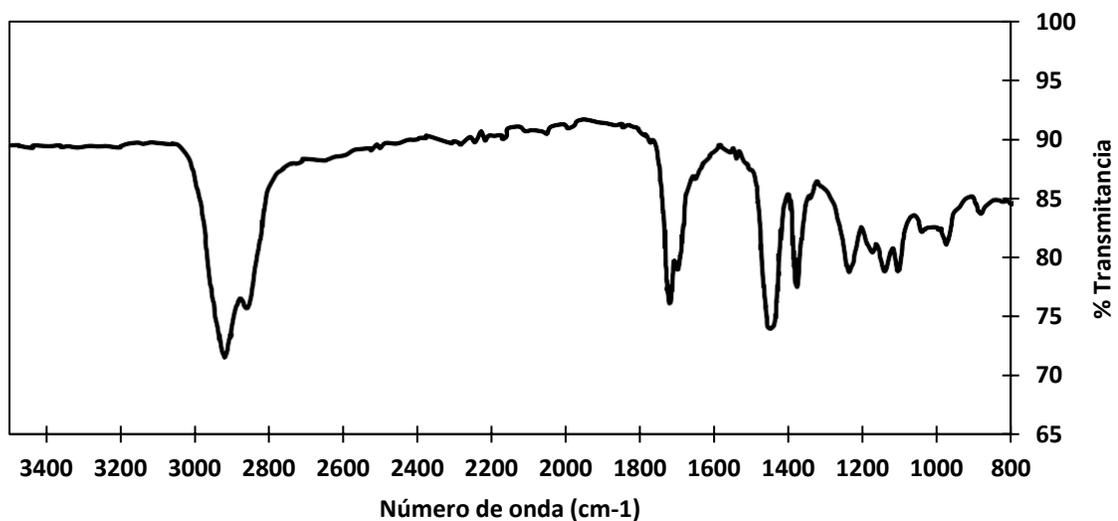


Figura 7. Espectro de infrarrojo de la muestra Amb-03.

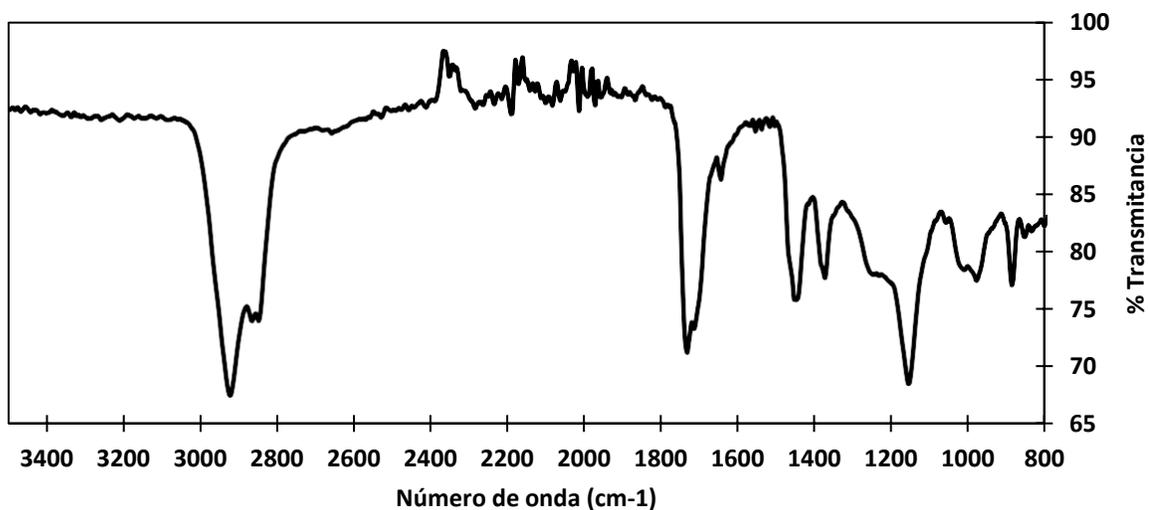


Figura 8. Espectro de infrarrojo de la muestra Amb-05

Consultando en la literatura, Beck (1965) reporta que el ámbar báltico se puede diferenciar de cualquier otro origen con su espectro de infrarrojo por la aparición de una señal en forma de hombro, debida a la absorción de un éster, entre 1250 cm⁻¹ y 1100 cm⁻¹ seguido de un pico en 1150 cm⁻¹ (Figura 9) y, efectivamente, en el espectro de la

muestra Amb-05 se presenta dicha señal, lo cual aporta en la diferenciación del ámbar de Chiapas con el del Báltico.

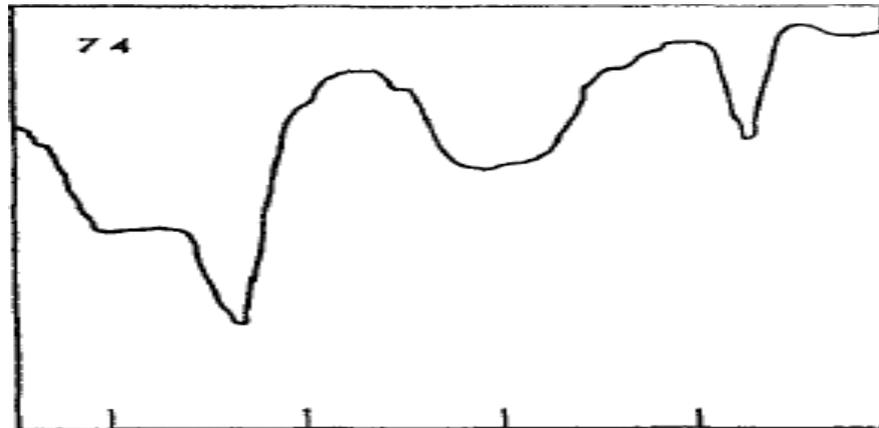


Figura 9. Bandas de referencia en el espectro de infrarrojo de ámbar báltico (Beck et al. 1965)

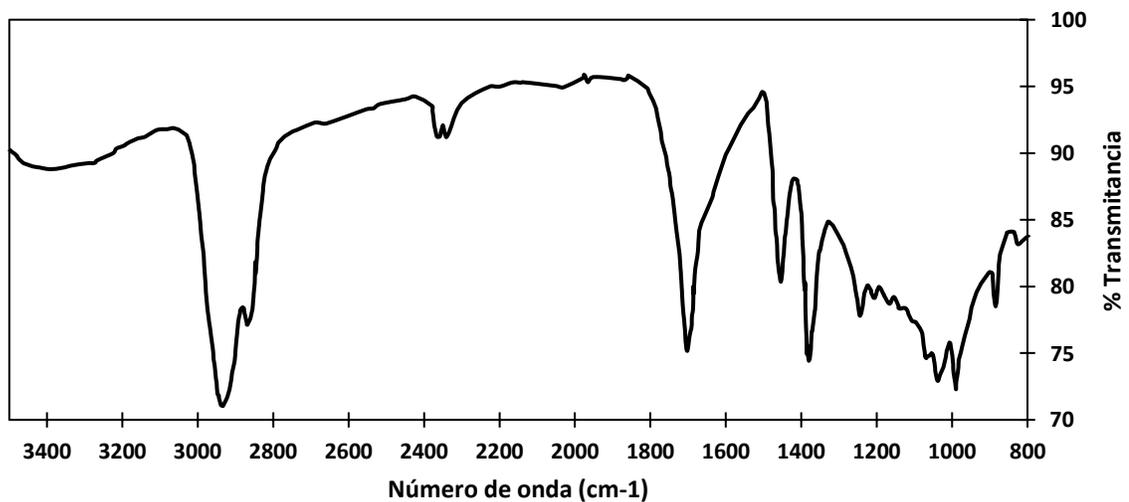


Figura 10. Espectro de infrarrojo de la muestra Cop-02.

Analizando los espectros de infrarrojo obtenidos para las dos muestras de copal, que son comúnmente utilizadas en la fabricación de imitaciones, presentan similitudes en el doblete de entre 2930 cm^{-1} y 2860 cm^{-1} , aunque se observa más completo en el espectro de la muestra Cop-02 (Figura 10) y, por el contrario, la banda de alrededor de 1700 cm^{-1} está más definida en el espectro de la muestra Cop-01 (Anexo 2 Figura 45). Las siguientes señales que se observan solo en la muestra Cop-02 son en 1450 cm^{-1} y 1380 cm^{-1} , provocadas por metilos,. La de 1240 cm^{-1} es emitida por ésteres y la de 989 cm^{-1} es emitida por la torsión de C-H, lo que indica que solo aparecen 7 de las 10

señales reportadas en la norma y solo 3 de ellas se encuentran dentro del intervalo que se reporta en la norma, lo que tiene sentido debido al tipo de estructuras que los componen. En adición a esto, en el espectro de Cop-02 se muestra una banda ancha que va de los 3200 cm^{-1} a los 3500 cm^{-1} característica de un enlace OH presente en los alcoholes.

Otra diferencia significativa es que, todos los espectros de ámbar de Chiapas presentaron las diez bandas características reportadas en la NOM-152-SCFI-2019. Sin embargo, no todos los valores en los que se encuentran las bandas están dentro del intervalo que establece la norma. En algunas solo hay cinco en otras máximo ocho quedan dentro del intervalo normativo. En cambio, en los espectros de las muestras dominicana y báltica hace falta una de las bandas en 975 cm^{-1} y 1105 cm^{-1} , respectivamente, además, de la muestra de ámbar dominicano solo seis de las bandas entran en el intervalo de la norma y de la muestra báltica solo tres de ellas.

Por otro lado, en la Tabla 3 se muestran los valores nominales de las bandas obtenidas para todas las muestras de ámbar chiapanecas con su respectiva incertidumbre expandida y los valores de referencia de la NOM bajo estudio. De la misma forma, los valores en negritas son de las bandas que no entran en el intervalo que se establece en la Tabla B.1 de la NOM-152-SCFI-2019. En el Anexo 2, Figuras 42 a 44, se muestran los espectros obtenidos para el resto de las muestras de ámbar de Chiapas.

En cuanto a la coincidencia de las 10 señales obtenidas mediante el análisis por infrarrojo indicadas en la NOM-152-SCFI-2019, no todas las piezas de ámbar analizadas muestran el total de bandas dentro de este intervalo. De las muestras Amb-01 y Amb-06 coinciden cinco bandas, de la muestra Amb-08 coinciden seis y, de las muestras Amb-02 y Amb-07 coinciden ocho bandas. Lo anterior tiene importancia debido a que se busca sustentar la denominación de origen y la norma reporta dichos intervalos para indexar las bandas obtenidas con las de referencia. Si bien no se especifica una restricción en cuanto a la validez de una banda, aun cuando la diferencia sea de una unidad, pero el hecho de que la banda se presente, aunque esté recorrida, le suma un valor al espectro al compararlo con el de referencia.

Tabla 3. Resultados de la prueba de ATR FT-IR para las muestras de ámbar de diferentes localidades de Chiapas.

Referencia	Amb-01		Amb-02		Amb-06		Amb-07		Amb-08	
NOM-152-SCFI-2019 (cm ⁻¹)	\bar{x} bandas obtenidas (cm ⁻¹)	U k=2	\bar{x} bandas obtenidas (cm ⁻¹)	U k=2	\bar{x} bandas obtenidas (cm ⁻¹)	U k=2	\bar{x} bandas obtenidas (cm ⁻¹)	U k=2	\bar{x} bandas obtenidas (cm ⁻¹)	U k=2
2924-2921	2917.49	0.06	2924.05	0.11	2921.9	-	2922.2	-	2920.2	-
2865-2852	2865.15	3.21	2864.29	0.16	2861.5	-	2864.1	-	2863.0	-
1727-1719	1729.59	0.47	1728.55	1.53	1726.4	-	1729.9	-	1727.7	-
1702-1698	1705.40	1.10	1703.18	0.41	1704.8	-	1701.6	-	1700.5	-
1457-1455	1452.12	2.77	1457.03	0.98	1453.0	-	1453.9	-	1453.5	-
1384-1378	1382.50	1.09	1379.14	0.74	1382.4	-	1378.8	-	1379.0	-
1242-1238	1242.77	1.05	1241.06	0.50	1236.4	-	1238.5	-	1238.5	-
1150-1136	1145.78	3.41	1144.42	0.37	1160.0	-	1137.8	-	1126.2	-
1108-1104	1104.61	1.29	1105.86	0.38	1105.5	-	1105.7	-	1103.7	-
978-972	972.53	0.49	975.62	0.45	979.7	-	974.4	-	975.8	-

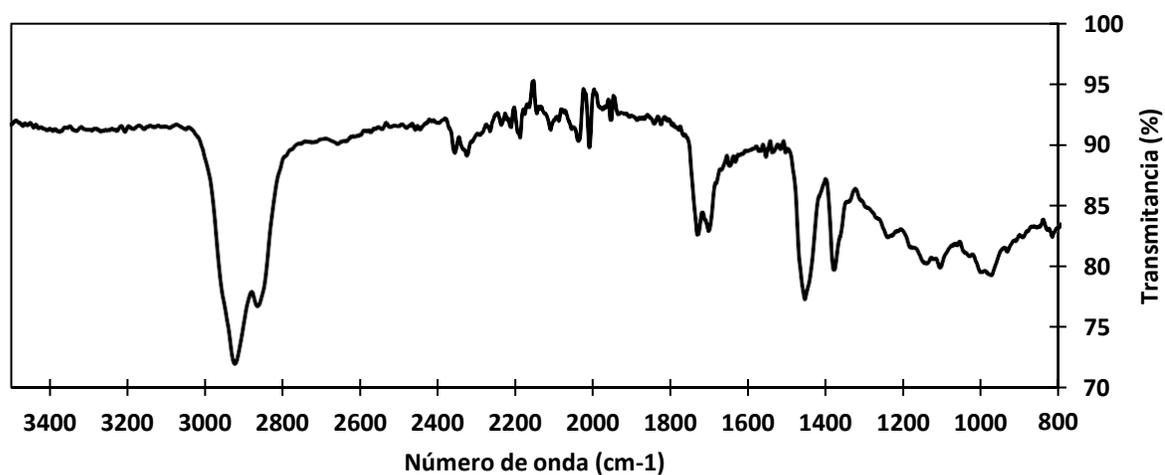


Figura 11. Espectro de infrarrojo de la muestra Amb-07.

Analizando los espectros de infrarrojo de las muestras de ámbar de Chiapas y los resultados de las bandas obtenidas (Tabla 3), todos los espectros presentan el doblete alrededor de 2922 cm^{-1} y 2863 cm^{-1} , unos más definido que otros y con un porcentaje de transmitancia más alto o bajo. Por ejemplo, la muestra Amb-07 (Figura 11) presenta el menor % de transmitancia de todas y la muestra Amb-02 (Figura 6) el mayor % de transmitancia. Por otra parte, el doblete que debiera aparecer entre 1727 cm^{-1} y 1698 cm^{-1} solo se observa en las muestras Amb-07 y Amb-08 (Anexo 2 Figura 44).

Si bien la NOM-152-SCFI-2019 establece que con la prueba de espectroscopia infrarroja es posible denominar el origen de una pieza de ámbar, esto mediante la indexación de las bandas características del espectro y con una coincidencia de las diez bandas contenidas en la Tabla B.1 de la NOM-152-SCFI-2019; poniendo en práctica el método de prueba y siguiendo el procedimiento, no se obtiene el resultado esperado. En primer lugar, así como se pide la muestra de un grosor de 3 mm de espesor, el accesorio ATR no logra detectar la muestra y, por lo tanto, no genera el espectro típico requerido ni la indexación. Además, faltan las especificaciones de las condiciones del análisis, por ejemplo: la resolución y número de escaneos; lo cual conlleva a que la obtención del espectro comparable al de referencia requiera que el método de análisis sea validado en el laboratorio.

7.1.2 Comportamiento con la luz ultravioleta.

Para esta prueba primero se experimentó con la longitud de onda larga de 366 nm y se observaron cambios de color en todas las muestras de ámbar, en algunas de un color azul fuerte y en otras más claro. En cambio, no se observaron cambios en las muestras de copal ni en la falsa (Anexo 1, Figura 37). Después se probó la longitud de onda corta de 254 nm y solo se observaron cambios en las muestras Amb-07 y Amb-08, a un tono azul. Los resultados fueron consistentes las tres veces que se llevaron a cabo.

Se tomó una decisión de cumplimiento, respecto a la especificación de la NOM-152-SCFI-2019 que se revisa, para cada muestra evaluada, las cuales se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de la prueba de la luz ultravioleta, incluido el dictamen de cumplimiento con la NOM-152-SCFI-2019.

Referencia NOM-152-SCFI-2019		ID interno	Resultado		¿Cumple criterio de la NOM?
Onda larga (366 nm)	Onda corta (254 nm)		Onda larga (366 nm)	Onda corta (254 nm)	
Cambio de color a un azul blanquecino	Cambio de color tenue o nulo	Amb-01	Azul blanquecino	-	SI
		Amb-02	Azul	-	SI
		Amb-03	Azul	-	SI
		Amb-05	Azul blanquecino	-	SI
		Amb-06	Azul blanquecino	-	SI
		Amb-07	Azul	Azul	SI
		Amb-08	Azul	Azul	SI
		Cop-01	-	-	NO
		Cop-02	-	-	NO
		Fals-01	-	-	NO

De acuerdo con los resultados de la tabla anterior todas las piezas de ámbar real presentaron un cambio de color a azul y, en el resto no se observó ningún cambio, lo cual coincide con la descripción indicada en la norma, de manera que esta es una prueba sencilla y valiosa para discriminar entre muestras genuinas y falsas.

7.1.3 Solubilidad en etanol

En esta prueba se evaluó la solubilidad del ámbar en etanol grado reactivo y se especifica que el peso de la muestra no debe variar en $\pm 5\%$, después de estar cubierta por etanol por 15 min y llevarla a sequedad en la estufa. Los análisis se realizaron por triplicado, se calculó el % de masa recuperada con la ecuación 3 y después se obtuvo la media de estos resultados, la cual se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de la prueba de solubilidad, incluido el dictamen de cumplimiento con la NOM.

ID interna	(%) Masa recuperada	U (%); k=2	¿Cumple criterio de la NOM?
Amb-01	99.66	0.57	SI
Amb-02	101.04	0.57	SI
Amb-03	101.10	0.35	SI
Amb-05	100.23	1.0	SI
Amb-06	99.70	1.0	SI
Amb-07	99.90	1.0	SI
Amb-08	100.00	1.2	SI
Cop-01	105.97	0.35	NO
Cop-02	104.04	0.35	SI
Fals-01	94.75	5.6	NO

Para cada % de masa recuperada se calculó la incertidumbre combinada (u_c) y, posteriormente, se obtuvo la incertidumbre expandida (U) con un factor de cobertura $k = 2$, que también está reportada en la Tabla 5, así como la respuesta cumplimiento con el criterio de la NOM-152-SCFI-2019.

Analizando los resultados de esta prueba, para las seis piezas de ámbar se tienen resultados que se encuentra entre 99.66 % y 101.10 %, es decir, que cumplen con el

porcentaje de variación (+/- 5 %) establecido en la NOM-152-SCFI-2019. Con respecto a las muestras de copal, Cop-01 y Cop-02, los porcentajes fueron 105.97 y 104.40 % respectivamente. Por el aumento de la masa final se puede elucidar que el copal absorbe el etanol; sin embargo, no se realizaron pruebas adicionales dado que está fuera del propósito de este trabajo

7.1.4 Dureza Shore D

Los resultados de esta prueba se muestran en la Tabla 6. Se obtuvieron del promedio de las diez mediciones realizadas. En esta tabla también se reporta la desviación estándar y la incertidumbre expandida.

Tabla 6. Resultados de la prueba de dureza

ID interna	Dureza (HD)	Desviación estándar (HD)	U; k=2 (HD)	¿Cumple el criterio de la NOM?
Amb-01	82.4	2.0	1.3	SI
Amb-02	88.8	0.9	0.60	SI
Amb-03	85.1	2.3	1.5	SI
Amb-05	83.1	2.0	1.3	SI
Amb-06	82.0	4.0	2.5	SI
Amb-07	76.2	4.3	2.7	NO
Amb-08	80.0	1.9	1.2	NO
Fals-01	89.5	2.1	1.1	SI
Fals-02	70.9	7.3	3.7	NO

El valor de dureza promedio se comparó con el criterio de la NOM-152-SCFI-2019, que es $86 \% \pm 5 \%$ y con ello se respondió a la pregunta de si cumple o no con el requisito. Conforme a lo anterior, cinco de las siete piezas de ámbar se encuentran dentro del intervalo establecido por la norma con la que se está evaluando. La muestra Fals-01

también cumple con este intervalo, e incluso la desviación estándar y la incertidumbre expandida son similares a las del ámbar real. Dos de las piezas de ámbar (Amb-07 y Amb-08) mostraron valores con un resultado superior al intervalo de referencia.

Los resultados que se obtuvieron aplicando los criterios de la norma se muestran en la Tabla 7, así como un dictamen de si las muestras son ámbar, en el caso de que cumplan con dichos criterios y, si lo son, si son de Chiapas.

Tabla 7. Resumen de resultados con base en el criterio de la NOM-152-SCFI-2019.

Muestra	¿Cumple el criterio para la prueba de...?				Con base en el criterio de la norma.	
	IR	UV-Vis	Solubilidad	Dureza	¿Se puede decir que es ámbar?	¿Se puede decir que es ámbar de Chiapas?
Amb-01	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Amb-02	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Amb-03	NO	SI	SI	SI	SI	NO
Amb-05	NO	SI	SI	SI	SI	NO
Amb-06	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Amb-07	SI	SI	SI	NO	SI	SI
Amb-08	SI	SI	SI	NO	SI	SI
Cop-01	NO	NO	NO	-	NO	-
Cop-02	NO	NO	SI	-	NO	-
Fals-01	NO	NO	NO	SI	NO	-

7.2 Pruebas complementarias

Como se observa en Tabla 7 “Resumen de resultados con base en el criterio de la NOM-152-SCFI-2019” aplicados a los resultados obtenidos, tenemos un 20 % de probabilidad de entregar un resultado falso positivo, como en el caso del copal que

cumplió con la prueba de solubilidad y, un 14.2 % de probabilidad de dar un resultado falso negativo, como las muestra Amb-07 y Amb-08 que no cumplieron con el valor de dureza especificado en la norma. Bajo este contexto se realizaron otras pruebas que mejoraran la toma de decisiones.

7.2.1 Identificación visual y sensorial

En esta prueba, se asignó un valor de uno al cumplimiento de cada aspecto evaluado en la Tabla 8, lo cual resulta en un total de 5, en el caso de que alguna pieza cumpliera las 5 características. Además, se asignó un valor de cero en caso de que la característica evaluada no cumpla con el criterio. Los resultados de esta prueba cualitativa se muestran en la siguiente tabla.

En el caso del color, todas las muestras, con excepción de la Fals-02, entran en la gama de colores que incluye la NOM-152-SCFI-2019 como referencia, por lo que el color no es una característica exclusiva del ámbar. En cuanto a la heterogeneidad tomando en cuenta los sedimentos, en las piezas de ámbar se perciben capas con contenidos y en direcciones diferentes y, generalmente las piezas falsas son uniformes, lo cual es de gran ayuda para identificar falsificaciones, principalmente las de vidrio. El siguiente aspecto evaluado fue la textura. Por lo regular, las piezas de ámbar son pulidas por los artesanos para darles brillo y forma, incrustarlas en algún dije o anillo y facilitar su comercialización. En estos casos, la pieza de ámbar tiene una textura lisa por fuera, pero al fracturarla queda con relieves y en capas. En cambio, las muestras de copal son demasiado rugosas y las piezas falsas, si bien son lisas por fuera, al intentar fracturarlas quedan partidas con cortes planos. Al cualificar la apariencia se tomó en cuenta que la muestra se pudiera pulverizar y, en ese sentido, solo las muestras de ámbar se pudieron hacer polvo. Finalmente, al evaluar la sensación térmica, solo las piezas falsas se percibieron totalmente frías debido a que son de vidrio, el resto se percibieron cálidas o una temperatura similar a la corporal. En resumen, la textura y la apariencia resultaron aspectos eficientes para evaluar e identificar al ámbar.

Tabla 8. Resultados de la identificación visual de las muestras de ámbar e imitaciones.

ID interna	Color	Heterogeneidad	Textura	Apariencia	Sensación térmica	Total
Amb-01	1	1	1	1	1	5
Amb-02	1	1	1	1	1	5
Amb-03	1	1	1	1	1	5
Amb-04	1	1	1	1	1	5
Amb-05	1	1	1	1	1	5
Amb-06	1	1	1	1	1	5
Amb-07	1	1	1	1	1	5
Amb-08	1	1	1	1	1	5
Cop-01	0	0	1	1	0	2
Cop-02	0	0	1	1	0	2
Fals-01	1	0	0	0	0	1
Fals-02	1	0	0	0	0	1

7.2.2 Fuerza Electroestática

Los resultados de la prueba de fuerza electroestática se muestran en la Tabla 9, en esta se asignó un valor de uno cuando la prueba fue positiva, es decir, cuando la aguja del electroscopio mostró un cambio de pendiente y un valor de cero cuando la prueba resultó negativa, con base en el método de la prueba.

Esta prueba se considera sencilla y eficaz y, aunque en este trabajo se utilizó un electroscopio analógico (Anexo 1, Figura 40) también es posible hacerla frotando el ámbar en un trozo de tela de lana y después acercarla a trozos de papel pequeños, sin que esto afecte los resultados. Lo interesante de esta prueba cualitativa es que no hay

términos medios, se mueve la aguja o no se mueve, es ámbar o no es. Además de que no es necesario hacer cálculos y las mediciones son rápidas.

Tabla 9. Resultados de la prueba de estática

ID interna	Resultado
Amb-01	1
Amb-02	1
Amb-03	1
Amb-05	1
Amb-06	1
Amb-07	1
Amb-08	1
Cop-01	0
Cop-02	0
Fals-01	0
Fals-02	0

7.2.3 Densidad

En la Tabla 10 se muestran los resultados de la prueba de densidad con los dos métodos utilizados, incluyendo la desviación estándar de las determinaciones con el aditamento para IPFNA y la incertidumbre expandida con factor de cobertura $k=2$ para ambos métodos.

Respecto a la determinación de la densidad, con el aditamento para IPFNA, resultó en mediciones con menor sesgo respecto al valor teórico del ámbar [(1.050 – 1.096) $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$], además de que no se requiere de ningún cálculo adicional, a excepción de la incertidumbre. Sin embargo, también mostraron valores más altos de incertidumbre expandida, lo cual se puede explicar por la necesidad de mejorar el proceso de

medición, tomando en consideración que el proceso es sensible a la temperatura del líquido, ya que puede ocasionar cambios de densidad en términos de magnitud de 0.001 °C a 0.1 por °C. Además, la muestra debe mojarse cuidadosamente y se requiere corroborar que esté libre de burbujas de aire, tanto el aditamento como la muestra. Y, en ese sentido, no se cuenta con un informe de calibración para el aditamento de la balanza, lo que vuelve los resultados con mayor dispersión.

Tabla 10. Comparación de los resultados de la prueba de densidad con dos métodos: picnómetro calibrado vs kit para densidad para IPFNA*.

ID interno	Picnómetro calibrado		Aditamento kit para densidad para *IPFNA		
	Densidad (g·cm ⁻³)	U (g·cm ⁻³); k=2	Densidad (g·cm ⁻³)	Desviación estándar (g·cm ⁻³)	U (g·cm ⁻³); k=2
Amb-01	0.9964	0.0013	1.009	0.051	0.032
Amb-02	0.9973	0.00030	1.022	0.050	0.032
Amb-03	0.9972	0.00030	1.029	0.012	0.0070
Amb-04	0.9978	0.00060	1.042	0.010	0.0090
Amb-05	0.9973	0.00030	-	-	-
Amb-06	0.9971	0.00030	-	-	-
Amb-07	0.9971	0.00030	-	-	-
Amb-08	0.9977	0.00030	-	-	-
Cop-01	0.9976	0.00030	-	-	-
Cop-02	0.9975	0.00030	-	-	-
Fals-01	1.0002	0.00030	-	-	-

Por otro lado, en la determinación de la densidad con el picnómetro también se debe tener cuidado que el agua no contenga burbujas, ya que se realiza un cálculo con la

masa del agua y se agregaría un error si se toma en cuenta también la masa del aire al hacer el cálculo de la densidad del agua o la densidad de nuestra muestra. Estas burbujas se pueden eliminar succionándolas con una jeringa, además se debe monitorear la temperatura del agua y del ambiente. Este método reflejó una mayor precisión en los valores nominales para las muestras de ámbar, pero valores de densidad alejados del valor teórico. Sin embargo, la balanza que se utiliza es trazable al patrón No.21 del CENAM (Anexo 5), lo que podría llevarnos a utilizar solo esta metodología. En adición a esto, aun cuando las mediciones se realizaron en diferentes días y en condiciones ambientales distintas, los valores obtenidos para las muestras de ámbar presentan desviaciones menores al 0.1 %.

7.2.4 Análisis Termogravimétrico y Calorimetría Diferencial de Barrido

Analizando los termogramas obtenidos de TGA, se tomaron como puntos de referencia la temperatura de inicio de pérdida de masa, la temperatura en donde se deja de perder masa o donde la pérdida es mínima y la temperatura en donde se observa la mayor pérdida de masa, esta última se logra apreciar en el DTG. Estos valores se encuentran reportados en la Tabla 11 para cada muestra. Se toman como ejemplo los termogramas de las muestras de ámbar de Chiapas (Figuras 12 y 15), de República Dominicana (Figura 18), del Báltico (Figura 21), así como de la pieza Fals-01 (Figura 24), el resto de termogramas se incluyen en el Anexo 3.

Para esta prueba podríamos tomar en cuenta el número de picos máximos que presenta cada muestra en relación con el origen de la pieza. Por ejemplo, la pieza de ámbar de República Dominicana (Amb-03) presentó tres picos máximos en el DTG, lo que significa tres pérdidas de masa en el intervalo de temperatura de trabajo y la pieza del Báltico (Amb-05) presentó solo una pérdida de masa significativa. Aunado a esto, todas las muestras de ámbar de Chiapas presentaron dos picos máximos de pérdida de masa, lo que demuestra que hay un tipo de comportamiento dependiendo del origen de la pieza.

Tabla 71. Compilación de resultados de los termogramas incluyendo DTG.

Muestra	Pérdida de masa (mg)	T inicio TGA (°C)	T final TGA (°C)	T máxima DTG (°C)
Amb-01	0.27	110.01	275.00	240.42
	4.25	280.00	492.12	432.24
Amb-02	0.26	109.32	285.21	237.03
	2.67	295.37	517.25	425.41
Amb-03	0.15	67.08	241.37	190.48
	0.62	254.20	390.00	376.35
	0.51	393.75	466.99	418.79
Amb-05	2.18	119.36	503.85	430.53
Amb-06	1.18	120.01	400.16	425.98
	1.55	403.91	510.84	391.83
Amb-07	0.24	124.29	322.64	267.19
	1.66	332.26	511.90	433.38
Amb-08	0.47	106.11	328.52	259.79
	2.18	338.68	523.67	427.12
Cop-01	2.87	76.70	326.38	266.05
	0.51	340.28	537.57	468.67
Fals-01	0.0070	44.62	161.71	52.62
	0.019	170.80	308.74	231.90
	0.029	317.29	487.31	411.18

Sin embargo, en el trabajo de Ragazzi et al. (2003) se muestran termogramas comparando la temperatura en la que se observa la mayor pérdida de masa para cada

muestra (DTG), para la muestra de México se muestra en 441 °C, para la dominicana en 400 °C y para la del Báltico en 402 °C, por lo que, de encontrar las mismas diferencias de temperatura en los termogramas experimentales sería posible identificar el origen de cada pieza.

A la par de los termogramas de TGA también se muestran los termogramas obtenidos por DSC, ya que se complementan y es más práctico compararlos y describirlos de manera simultánea. Los termogramas de las muestras de ámbar de Chiapas analizadas se muestran en las Figuras 13 y 16, para el ámbar de República Dominicana en la Figura 19, para el ámbar del Báltico en la Figura 22 y para una muestra falsa en la Figura 25, así como las respectivas partes de la pieza con tonalidades distintas utilizadas para cada análisis.

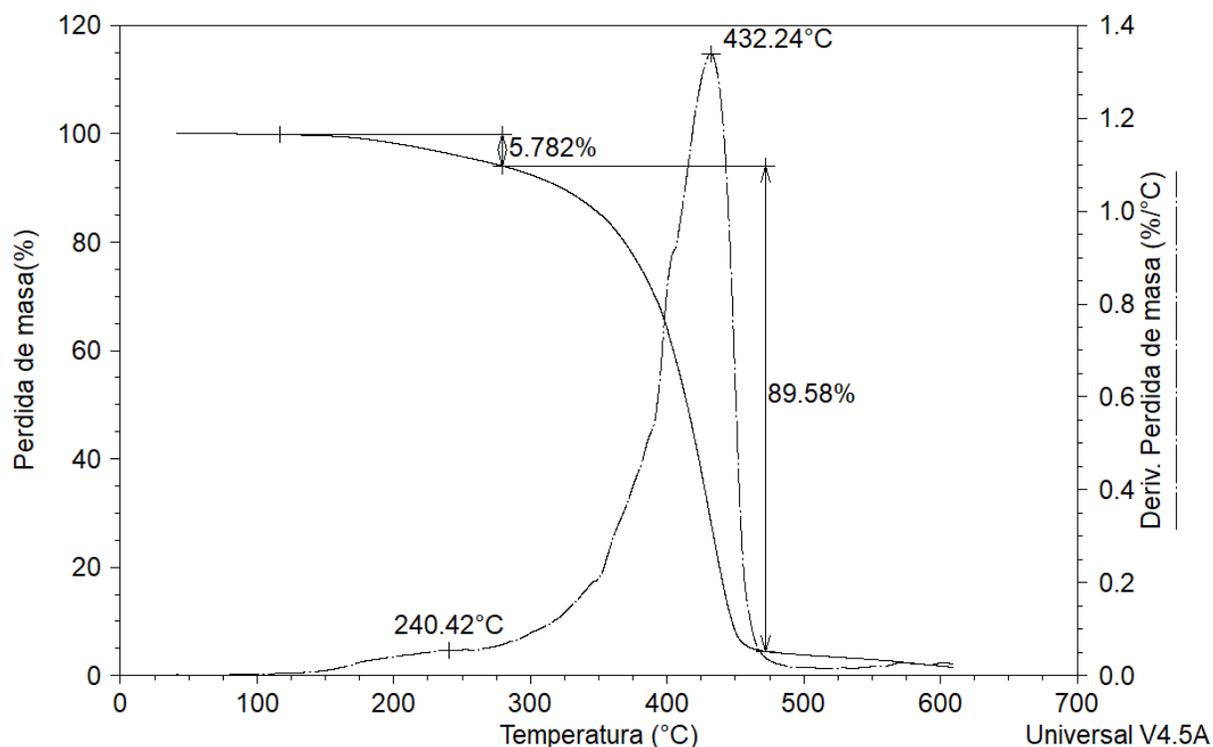


Figura 12. Termograma de la muestra Amb-01 (TGA)

En el termograma de la Figura 12 se puede observar que hay dos pérdidas de masa: la primera ubicada en la derivada del termograma en 240 °C y la segunda en 432 °C

durante el proceso de calentamiento, aunque la segunda fue la perdida mayoritaria. La primera inicia después de los 110 °C de manera lenta, mientras que la segunda inicia en 350 °C y la descomposición se acelera hasta llegar a los 500 °C, donde prácticamente ya no hay muestra.

En el termograma obtenido por DSC (Figura 13) se observan tres procesos de calentamiento simultáneos a muestras de diferentes tonalidades de una pieza de ámbar chiapaneco (Figura 14). Durante el proceso de calentamiento que comenzó desde 0 °C y hasta los 500 °C, se logra observar primero la temperatura de transición vítrea, esta se muestra a una temperatura de 125 °C para la muestra de 2.54 mg y para las otras dos muestras se observa alrededor de 160 °C, esta diferencia de temperatura se puede atribuir a la cantidad de muestra analizada. Después comienza la descomposición de las tres muestras después de los 300 °C, que es lo que se observa con pendiente positiva en la Figura 13 y que justo coincide con el decaimiento de la masa del termograma en la Figura 12.

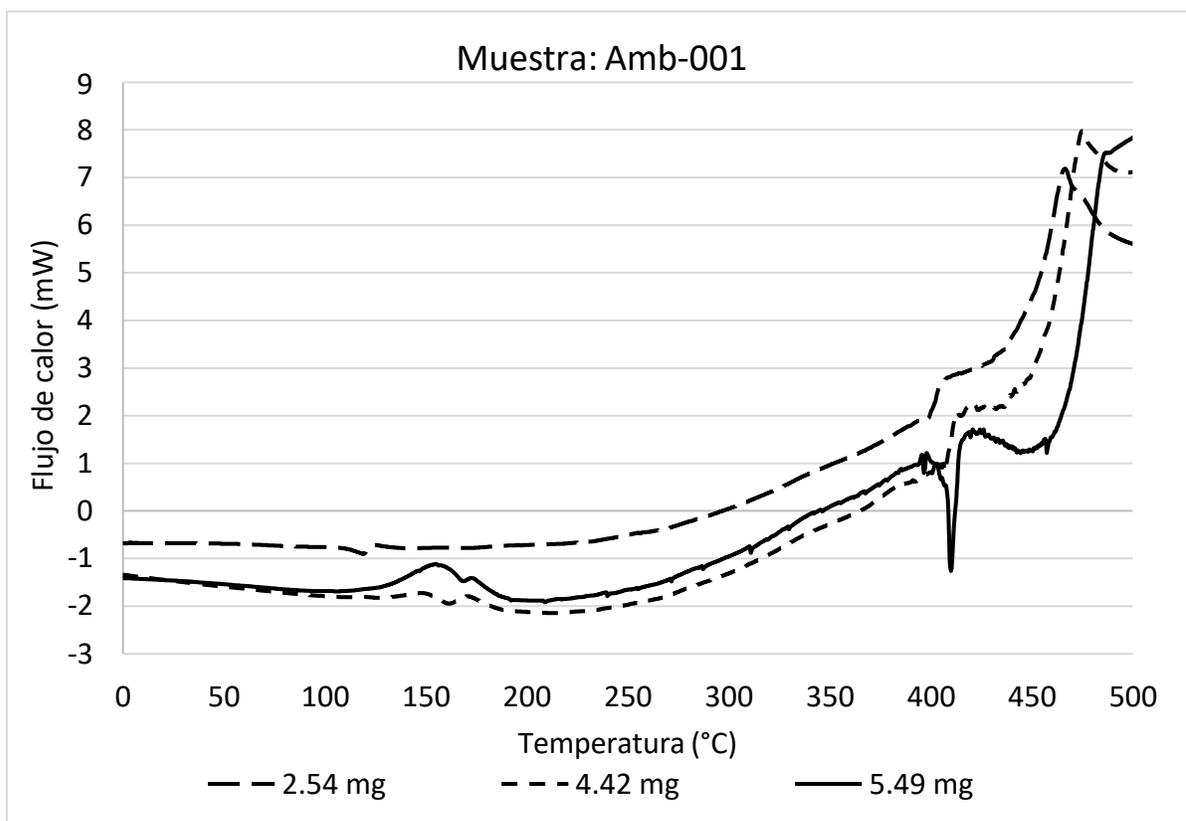


Figura 13. Termograma de la muestra Amb-01 (DSC)

Además, el ruido que aparece en la muestra de 5.49 mg en la Figura 11, entre 200 °C y 450 °C, es porque la muestra está en trozo (Figura 14), es decir, compactada y, al ir aumentando la temperatura se producen estas variaciones en el flujo de calor, cuando la pieza se va rompiendo o fracturando. Entonces como se monitorea el flujo de energía que demanda la muestra se alcanzan a registrar estas proyecciones y es lo que se muestra como inestabilidad en el análisis. Aunado a esto, la muestra analizada tiene mayor masa que las otras dos.

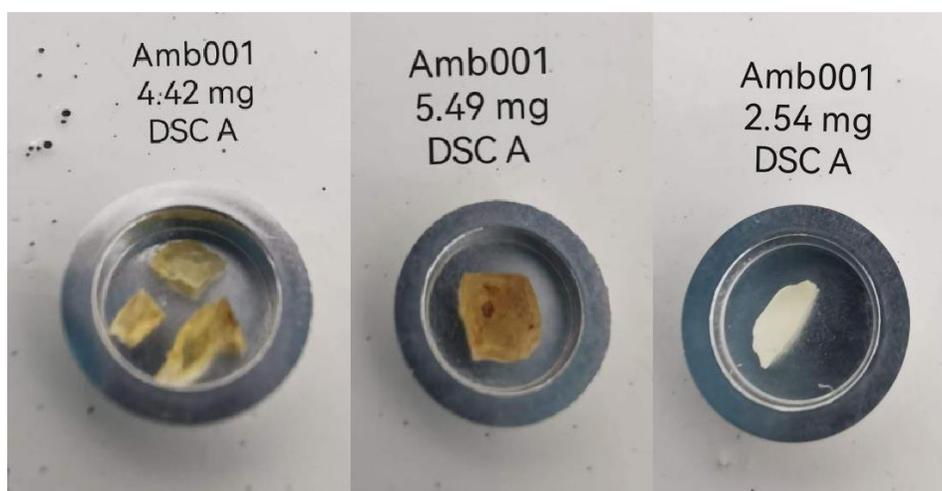


Figura 14. Muestras de diferentes tonalidades de Amb-001 para la prueba por DSC

Se analizó otra pieza de ámbar de Chiapas en la que se obtuvo el termograma de la Figura 15. Se lograron identificar dos pérdidas de masa, una con un pico máximo en 237 °C y otra en 425 °C, aunque esta última fue la pérdida mayoritaria.

Comparando estas dos piezas de ámbar de Chiapas (Amb-01 y Amb-02) presentan temperaturas muy similares entre sí, además de que las temperaturas de los picos máximos son cercanas a la reportada en el artículo de Ragazzi, que es de 441 °C.

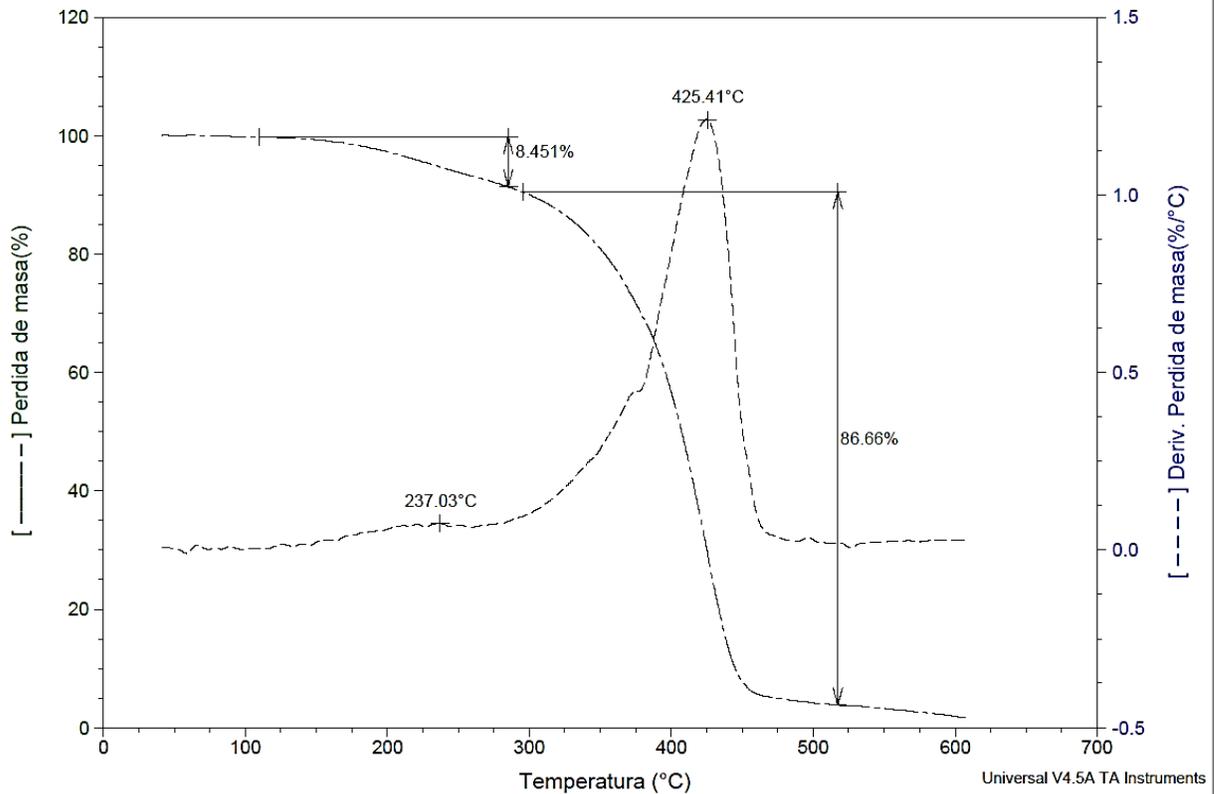


Figura 15. Termograma obtenido para la muestra Amb-02 (TGA)

También se realizó el análisis por DSC de la muestra Amb-02 por duplicado con un solo trozo de muestra (Figura 16), el cual se inició en 0 °C y se aumentó la temperatura hasta los 500 °C. En la Figura 16 se observa, entre 150 °C y 200 °C, la temperatura de transición vítrea para ambas corridas, aunque es más evidente la transición para la muestra de 3.30 mg. Además, la descomposición en ambas corridas comienza después entre los 250 °C y 300 °C, tal y como se observa en el TGA (Figura 15) como pérdida de masa.

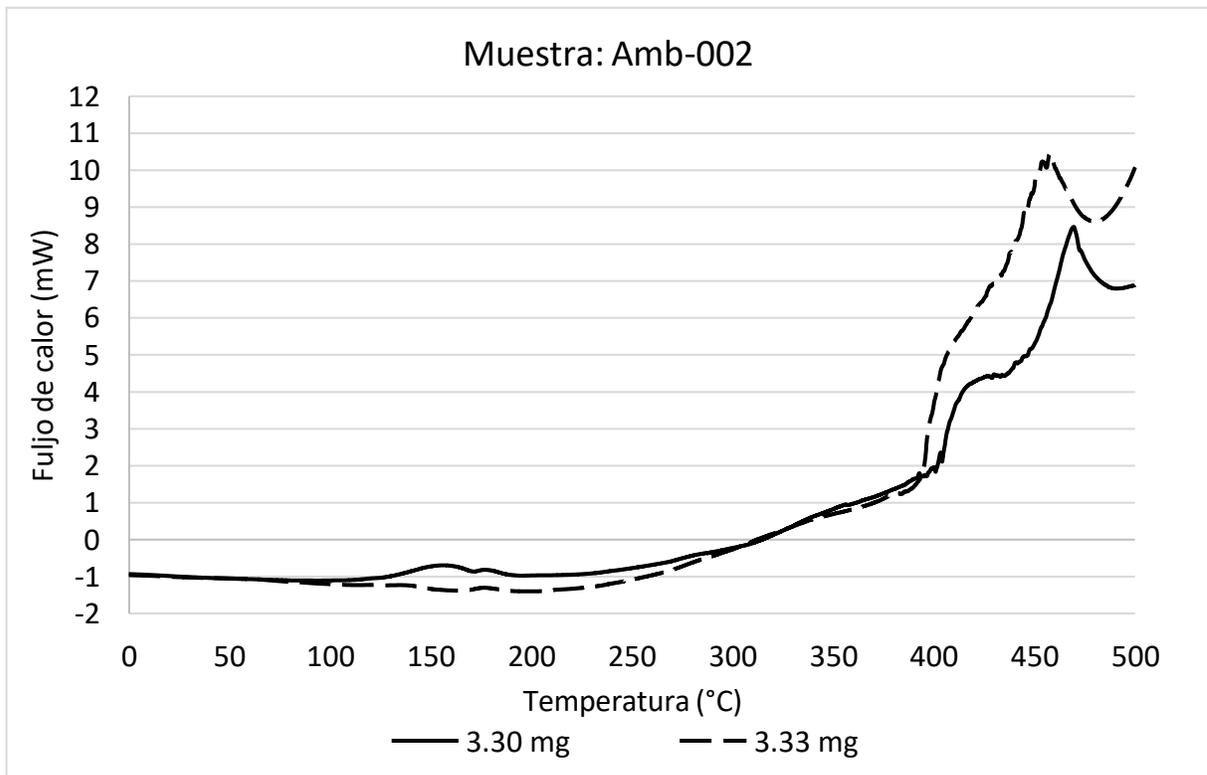


Figura 16. Termograma de la muestra Amb-02



Figura 17. Muestra de Amb-02 para la prueba por DSC.

En el caso del Termograma de la Figura 18 para la muestra de ámbar de República Dominicana, se muestra una descomposición multietapa en la que los productos intermedios no son estables. Es por eso por lo que la pendiente de descomposición tiende más lentamente a cero durante el proceso de calentamiento, hasta que el 88 %de la muestra se descompone a 480°C. En consecuencia, se observan tres decaimientos de masa en el termograma, si bien la segunda es la pérdida de masa mayoritaria, pero la tercera ocurre en un intervalo más corto de temperatura, por lo que la pendiente es mayor y se toma como el pico máximo. Este se muestra en 418 °C, que es un valor menor a las temperaturas obtenidas para las piezas chiapanecas, pero mayor a la temperatura que se tomó como referencia para este análisis que es 400 °C.

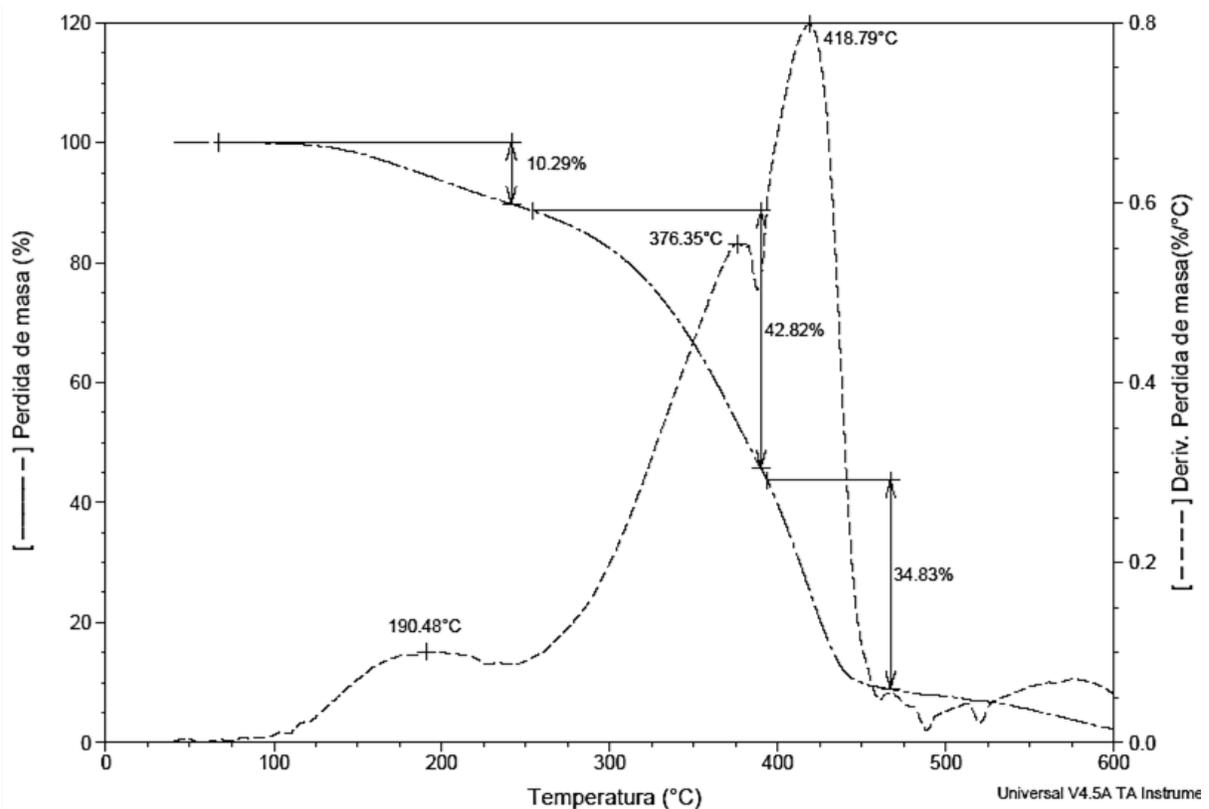


Figura 18. Termograma de la muestra Amb-03 (TGA)

En cuanto al análisis por DSC para la muestra Amb-03, se realizaron 3 corridas para las muestras de la Figura 20 que tienen tonalidades diferentes. Se obtuvo el termograma de la Figura 19, en donde se observa la temperatura de transición vítrea por debajo de los 150 °C y, aunque es menos evidente para la muestra de 3.13 mg, es

normal observar solo un pequeño cambio en la pendiente y no tal cual un pico endotérmico. Además, la descomposición de la muestra comienza después de los 250 °C, así como también se muestra en la Figura 18.

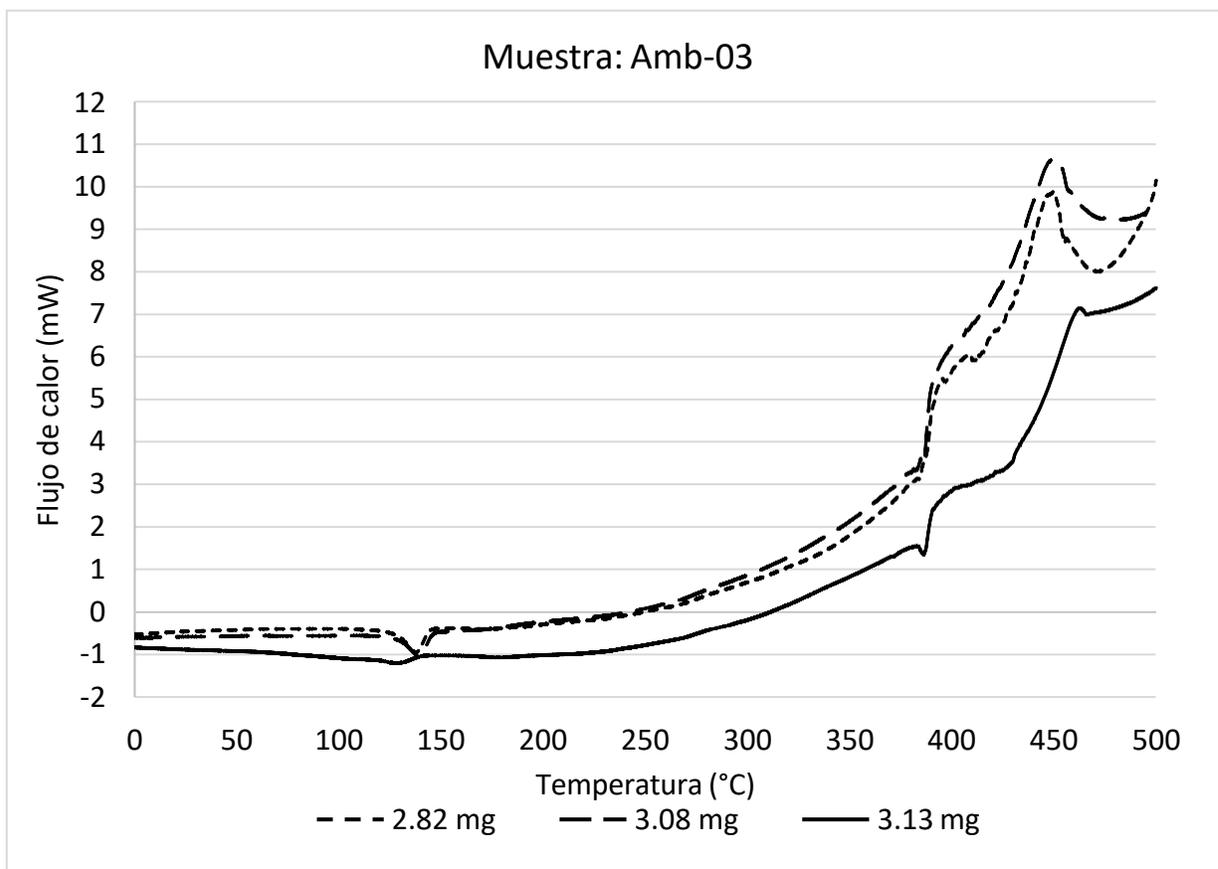


Figura 19. Termograma de la muestra Amb-03



Figura 20. Muestras de diferentes tonalidades de Amb-03 para la prueba por DSC.

En el análisis termogravimétrico de la muestra de ámbar del Báltico se obtuvo el termograma de la Figura 21, en donde se observa solo una pérdida de masa del 98 % y un pico máximo en 430 °C, que es una temperatura similar a la obtenida para la muestra Amb-01. Sin embargo, en este análisis se observa una descomposición simple, lo que es de gran ayuda para la identificación del origen del ámbar.

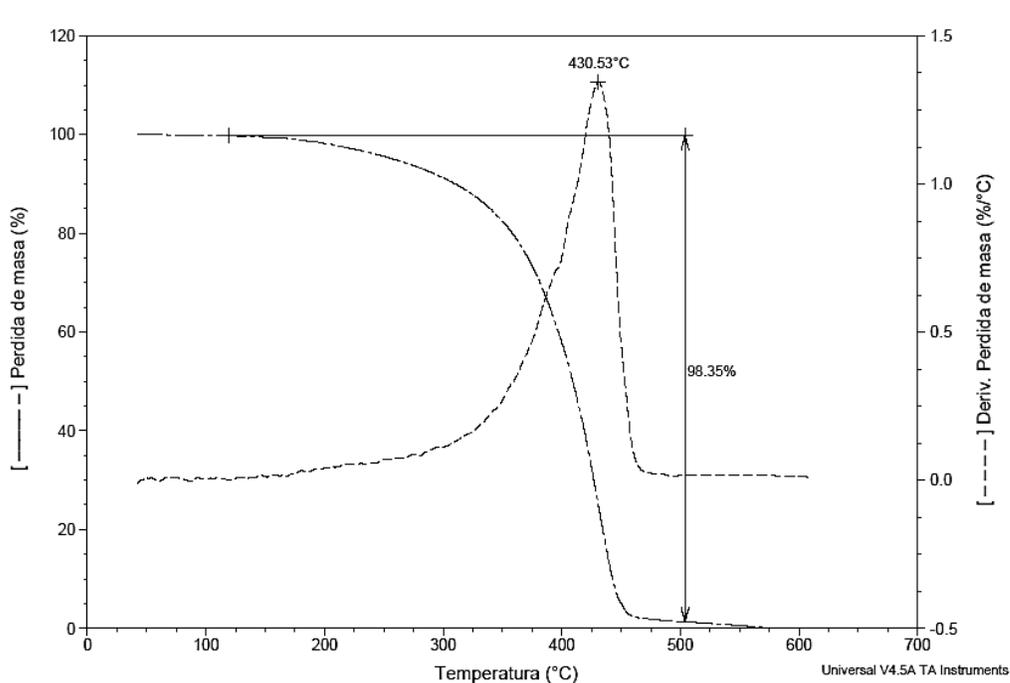


Figura 21. Termograma de la muestra Amb-05 (TGA)

Por otro lado, se analizaron por DSC dos trozos de la muestra de ámbar del Báltico (Figura 24) por DSC, ambas con la misma tonalidad, obteniendo el termograma de la Figura 22, en donde se observa que el comportamiento de ambas muestras es análogo. Sin embargo, en la Figura 23, se muestra un acercamiento en las temperaturas por debajo de los 300 °C, para lograr visualizar la transición vítrea, que ocurre en 110 °C para la muestra de 2.46 mg y en 130 °C para la muestra de 2.82 mg. Después de esta temperatura solo se observa la descomposición de la muestra, que comienza después de los 150 °C y que aumenta su velocidad de descomposición después de los 300 °C y culmina en los 480 °C, que lo que se muestra como un pico exotérmico.

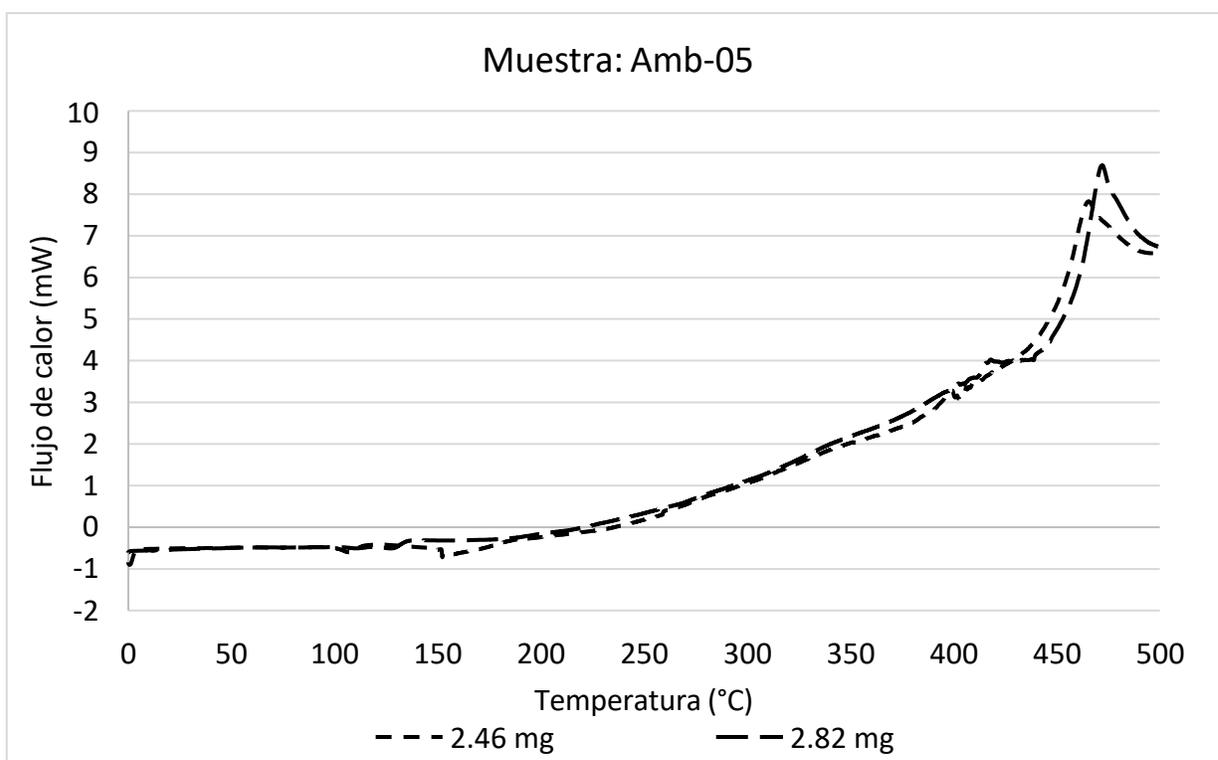


Figura 22. Termograma de la muestra Amb-05

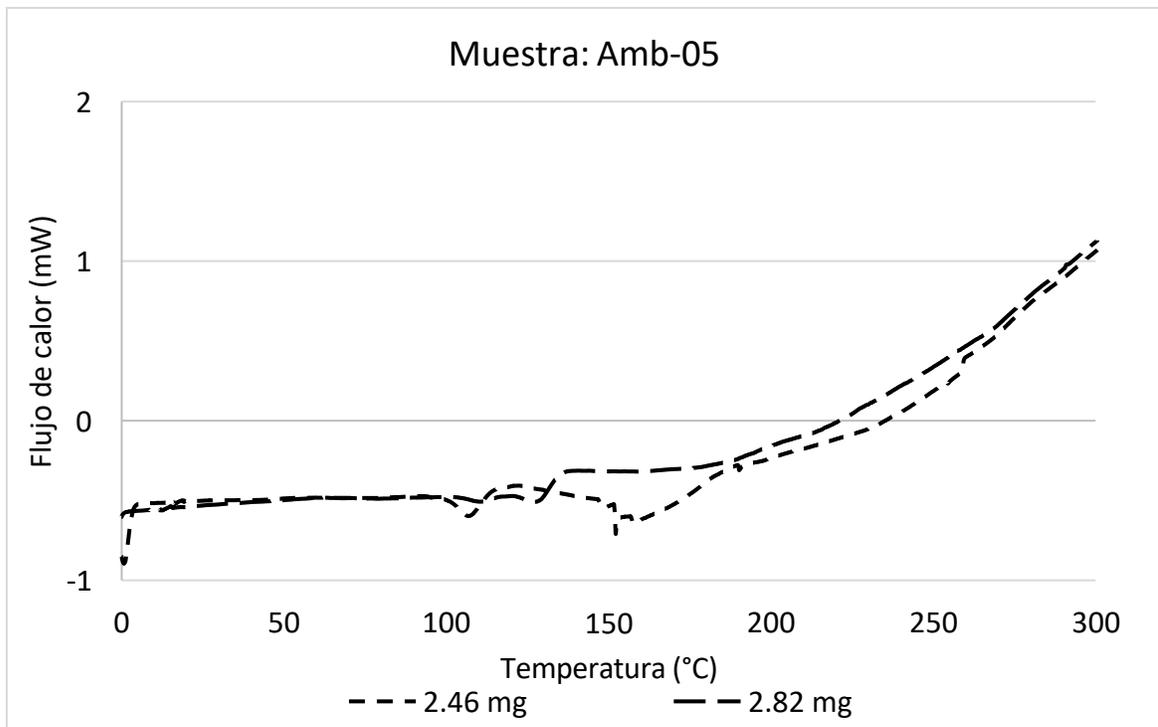


Figura 23. Termograma de la muestra Amb-05



Figura 24. Muestras de Amb-05 para la prueba de DSC.

El termograma de la Figura 25 muestra el análisis por TGA de la muestra falsa que se comercializa como ámbar. En este se presenta una descomposición multietapa en donde los productos intermedios no son estables y, además, las pérdidas de masa son poco significativas respecto a la masa inicial de la muestra, ya que son de alrededor del

0.1 % en todo el intervalo de temperatura del análisis. De las 3 pérdidas de masa que se muestran, la máxima aparece a una temperatura de 411 °C.

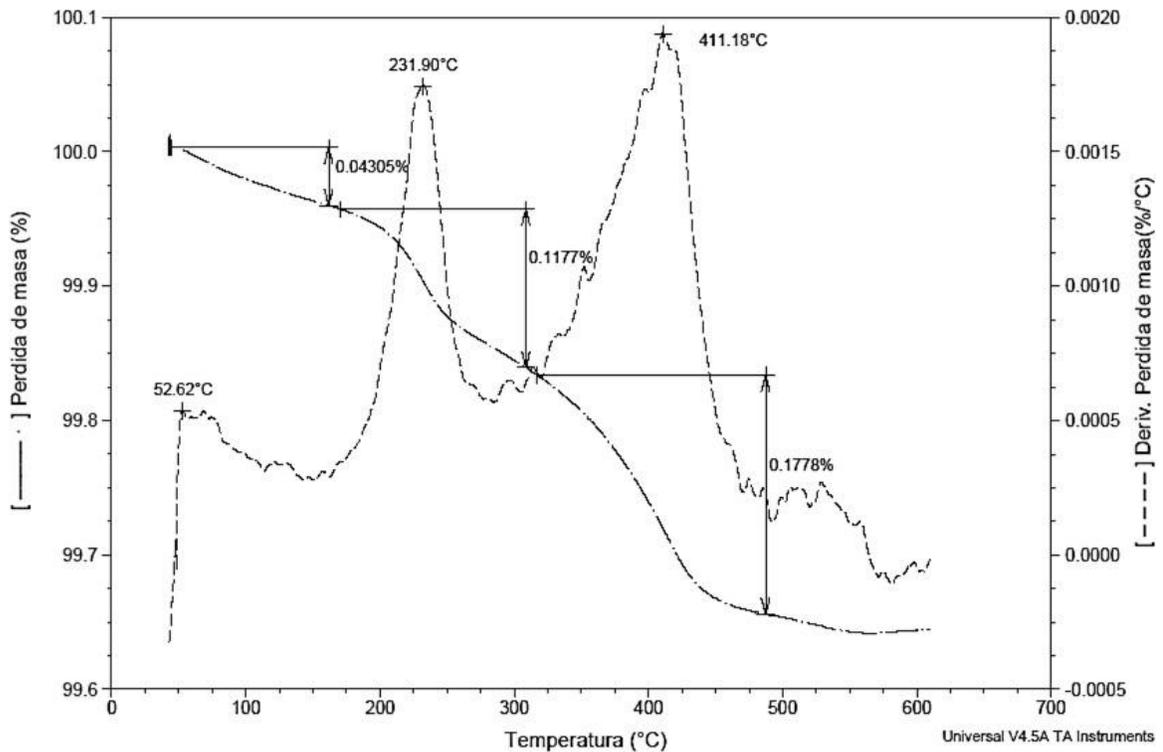


Figura 25. Termograma de la muestra Fals-01 (TGA)

Al analizar un trozo de esta pieza falsa (Figura 27) por DSC, se obtuvo el termograma de la Figura 26, en donde se observan algunos cambios de pendiente que se podrían atribuir a las pérdidas de masa del TGA para esta muestra. Primero se observa una pequeña curvatura alrededor de 200 °C en el DSC que se puede relacionar con el inicio de la segunda pérdida de masa en el TGA. También se observa en el DSC un pico entre 300 °C y 400 °C, que es en donde inicia la tercera pérdida de masa en el TGA.

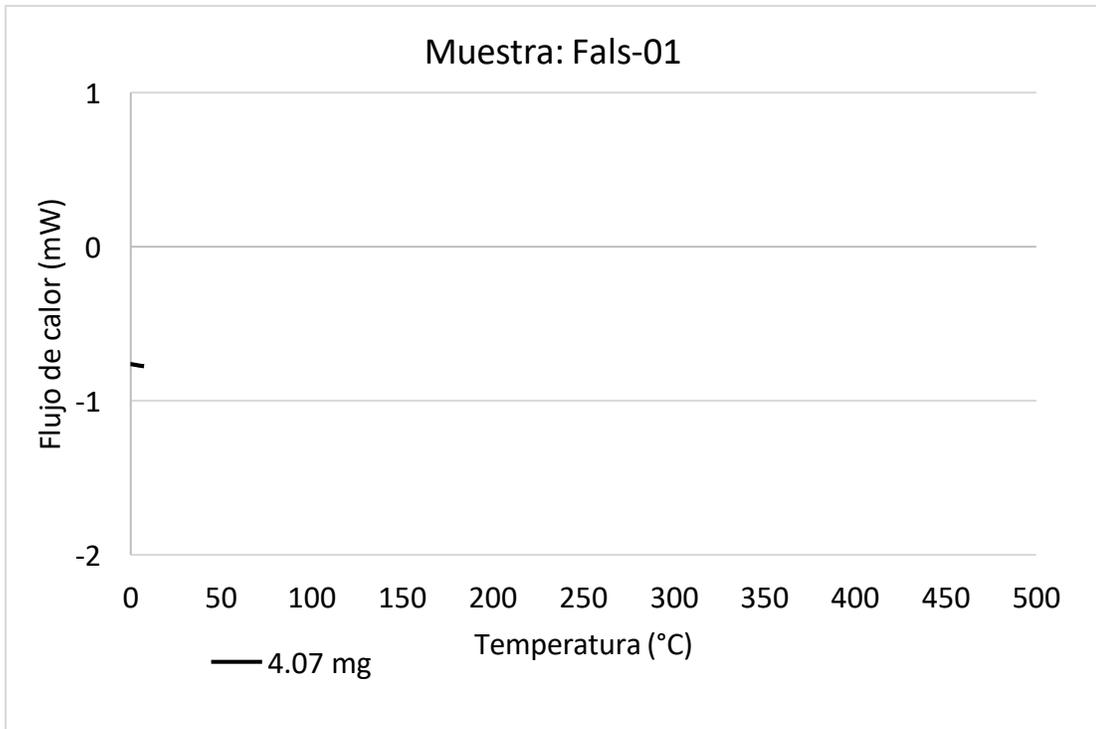


Figura 26. Termograma de la muestra Fals-01 (DSC).



Figura 27. Muestras de Fals-01 para la prueba de DSC

Volviendo al análisis termogravimétrico (TGA), solo se tienen antecedentes de comparación para saber si es ámbar mexicano del 2007 (Feist, 2007), pero no específicamente si es chiapaneco. Sin embargo, se llevó a cabo el análisis para demostrar si es posible observar diferencias en la temperatura de degradación de cada muestra. En resumen, analizando los resultados de esta prueba para el ámbar de las tres regiones diferentes, se observa que el ámbar báltico solo presenta una pérdida de masa durante el calentamiento de la muestra. En cambio, la muestra de ámbar dominicana presenta tres pérdidas de masa significativas, en 190 °C, 376 °C y la mayor pérdida en 419 °C. Y, en el caso de las muestras chiapanecas, se observaron dos pérdidas de masa en todos los casos, con lo cual sería sencillo denominar el origen del ámbar mediante el número de etapas de pérdida de masa por TGA.

Para la parte de identificación de falsificaciones, este análisis también permite observar diferencias significativas entre las muestras de ámbar auténtico con las falsas, como en este caso, la muestra de copal. Es posible notar que el copal presenta dos pérdidas de masa significativas, pero a temperaturas diferentes que el ámbar, en 260 °C y 470 °C aproximadamente. De la misma manera, observando el termograma de la muestra Fals-01, presenta tres pérdidas de masa: la primera en 80 °C, la segunda en 230 °C y la tercera en 400 °C. Sin embargo, estas pérdidas de masa son poco significativas, de alrededor de 0.1 %. Con lo anterior es posible descartar estas dos muestras de entre las muestras de ámbar real. Y, en general, la descomposición de las muestras inicia entre 110 °C a 125 °C y termina en 450 °C.

Por otra parte, en general en los análisis por DSC se observaron los mismos resultados para todas las muestras de ámbar real, solo se obtuvo un termograma diferente para la muestra de vidrio. Para las muestras de ámbar se observa la temperatura de transición vítrea que esta entre 100 °C y 200 °C y la descomposición de la muestra que comienza después de los 250 °C, por lo que no se tomaría en cuenta dentro de las pruebas para sustentar la denominación de origen del ámbar de Chiapas.

En la Tabla 12 se integran los resultados obtenidos en la Tabla 7 con lo obtenido de las pruebas complementarias. En esta se puede observar que no se obtienen falsos positivos ni negativos para las pruebas de identificación visual y sensorial y fuerza

electrostática, lo que nos indica que son pruebas que se podrían implementar en el método de prueba de la norma, junto con el análisis termogravimétrico y que mejoran el porcentaje de falsos positivos y negativos obtenidos de las pruebas, resultando en un total de 7.8 % de falsos negativos y 11.1 % de falsos positivos, sin tomar en cuenta las pruebas de densidad y calorimetría diferencial de barrido, cuyos resultados no aportaron a la toma de decisión respecto al ámbar y su origen.

Tabla 12. Resumen de resultados de las pruebas complementarias

Muestra	¿El resultado de la prueba fue positivo?				
	Identificación visual y sensorial	Fuerza electrostática	Densidad	TGA	DSC
Amb-01	SI	SI	NO	SI	NO
Amb-02	SI	SI	NO	SI	NO
Amb-03	SI	SI	NO	SI	NO
Amb-04	SI	SI	NO	-	-
Amb-05	SI	SI	NO	SI	NO
Amb-06	SI	SI	NO	SI	-
Amb-07	SI	SI	NO	SI	-
Amb-08	SI	SI	NO	SI	-
Cop-01	NO	NO	NO	NO	-
Cop-02	NO	NO	NO	-	-
Fals-01	NO	NO	NO	NO	NO

8. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados expresados en el presente trabajo, la espectroscopia infrarroja, una de las pruebas incluidas en la NOM-152-SCFI-2019 permite sustentar la denominación de origen del ámbar de Chiapas, dado que todas las piezas de ámbar de Chiapas presentaron las diez bandas requeridas, aun cuando en todos los casos analizados hay al menos dos bandas que están fuera del intervalo marcado por la norma. La banda en la que se tiene una diferencia mayor es en la de 1150 cm^{-1} a 1136 cm^{-1} con 10 cm^{-1} para la muestra Amb-06 hacia arriba y en la muestra Amb-08 10 cm^{-1} hacia abajo. Para el resto de las piezas las diferencias oscilan entre 0.8 cm^{-1} y 4 cm^{-1} .

Con respecto a las dos piezas de ámbar de origen diferente presentan nueve de las diez bandas referidas por la norma. Además, en el caso de la muestra de República Dominicana hay tres bandas fuera del intervalo requerido, con una diferencia desde 0.2 cm^{-1} hasta 2 cm^{-1} . Y, en el caso de la muestra de Báltico hay seis bandas fuera de la región de aceptación normada, con una diferencia de 1 cm^{-1} a 10 cm^{-1} . Esto, nos lleva a aceptar prueba de infrarrojo con la base suficiente para sustentar la denominación de origen del ámbar.

Por lo que se refiere a aplicar los métodos de prueba especificados en la NOM-152-SCFI-2019 a las muestras de ámbar incluidas en este trabajo, permiten saber si la pieza que se analiza es ámbar, además de construir un criterio sobre su origen. De acuerdo con los resultados obtenidos, solo el método para observar el comportamiento del ámbar con la luz ultravioleta permite identificar las falsificaciones de ámbar, de manera rápida y confiable, aunque poco segura en el ámbito de la salud. El resto de los métodos resultan en errores de dictamen, es decir, se obtienen falsos positivos o falsos negativos. Esta parte se puede robustecer usando clasificación estadística. Sin embargo, la cantidad de datos que se tienen actualmente son insuficientes. Por lo que, una propuesta de proyección de este trabajo es reunir más piezas, de forma que se pueda tener una base de tamaño suficiente para categorizar con mayor confiabilidad las muestras problema.

En la búsqueda de otra prueba que también permitiera identificar al ámbar de entre falsificaciones, se encontró la prueba electrostática, una prueba cualitativa y no

destruccion, que adem6s no requiere de alta infraestructura como prueba r6pida para peque1os comerciantes y el resultado obtenido es si provoca un cambio en las agujas del electroscopio o no, o incluso, levantar papelitos despu6s de ser frotada con un pa1o de lana. Por lo que esta prueba podr6a ser 6til para reemplazar a la l6mpara de luz ultravioleta, ya que no tiene efectos nocivos contra la salud a largo plazo. Adem6s, de acuerdo con la experiencia adquirida se recomienda que primero se realice la prueba de identificaci6n visual y sensorial, por ser el antecedente ocular de la pieza.

De manera general, tanto las pruebas normadas como las complementarias se integran y es posible sumarlas para la toma de decisi6n para la autenticidad del 6mbar, con lo cual es posible generar un m6todo de prueba sustentado en la NOM-152-SCFI-2019 para la evaluaci6n y aceptaci6n del 6mbar Chiapaneco.

La adquisici6n de informaci6n extra sobre el 6mbar, datos de inter6s o propiedad caracter6stica que se pueda agregar es de suma importancia para seguir complementando el conocimiento sobre esta resina.

9. RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS

Una parte importante para considerar es que el número de muestras de ámbar es limitado, así como que las tres zonas comentadas en este trabajo no son las únicas conocidas por la producción de ámbar, por lo que sería interesante continuar con este proyecto aumentando el número de muestras de cada zona.

Se puede continuar con el análisis por DSC, pero con cambios en las condiciones de temperatura. Con ese análisis se podría ir más a fondo en la parte de interpretación para aumentar la información que se puede obtener de los termogramas.

Se propone realizar un análisis elemental, también podría ayudar con la denominación de origen del ámbar de Chiapas. Ragazzi, Roghi, Giaretta y Gianolla (2003) señalan que es posible determinar el carbono, el hidrógeno, el nitrógeno y el azufre de las muestras de ámbar. De acuerdo con los autores, los resultados de este análisis permitirían diferenciar al ámbar de México, al de República Dominicana y al del Báltico. Los valores que ellos obtuvieron muestran que el ámbar mexicano es el que tiene mayor porcentaje de carbono, con un 83.65 %, a diferencia del dominicano y el del báltico que presentan 78.86 % y 77.42 %, respectivamente. Al analizar el hidrógeno, el ámbar mexicano también presenta mayor porcentaje, 11.24 %, comparado con un 10.56 % para el dominicano y con un 10.14 % para el báltico. Finalmente, los porcentajes que obtuvieron para el oxígeno fueron 4.74 % para el mexicano, 10.54 % para el dominicano y 12.01 % para el báltico, con los cuales también es posible notar una diferencia y, por lo tanto, coadyuvar a determinar el origen del ámbar, al menos de estas tres regiones.

BIBLIOGRAFÍA

Angelini, I. & Bellintani, P. (2005) Archeological ambers from northern Italy: and FTIR-DRIFT study of provenance by comparison with geological amber database. Vol. 47. Pp. 441-454.

Beck, C., Wilbur, E., Meret, S., Kossove, D. & Kermani, K. (1965). The infrared spectra of amber and the identification of baltic amber. New York.

Brody, R., Edwards, H., Pollard, M. (2001) A study of amber and copal samples using FT-Raman spectroscopy. Doi: 1386-1425/01/\$

Cutiño, E., & Penedo, M. (2011). ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO Y TÉRMICO DIFERENCIAL DE DIFERENTES BIOMASAS VEGETALES. Tecnología Química, XXXI (2), 36–43

DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN (2000). DECLARATORIA general de protección de la denominación de origen Ambar de Chiapas. SEGOB. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2063660&fecha=31/12/1969#gsc.tab=0

DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN (2021). Norma Oficial Mexicana NOM-152-SCFI-2019, ámbar de Chiapas-Especificaciones y métodos de prueba. (cancela a la NOM-152-SCFI-2003). Diario Oficial de la Federación. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5623275&fecha=08/07/2021

EURACHEM. (2021). CITAC Guide Assessment of performance and uncertainty in qualitative chemical analysis.

Feist, M., Lamprecht, I., & Muller, F. (2007). Thermal investigations of amber and copal. Vol. 458. Pp. 162-170. DOI: 10.1016/j.tca.2007.01.029

Gabbott, P. (2008). Principles and Applications of Thermal Analysis. Pp. 2-5.

Gómez, C. (2012). Caracterización térmica y mecánica de polibutilentereftalato (Pbt) reforzados con fibra de vidrio. Universidad Politécnica de Cartagena.

González-Púmariega, M., Vernhes, M. & Sánchez-Lamar, A. (2009). La radiación ultravioleta. Su efecto dañino y consecuencias para la salud humana. Universidad del Bío Bío, Chile. Vol. 18, núm. 2, pp. 69-80.

Gugliotta, L. International Confederation for Thermal Analysis and Calorimetry (ICTAC), ANÁLISIS TÉRMICO DE POLÍMEROS. Pp. 1–17.

Guiliano, M., Asia, L., Onoratini, G., & Mille, G. (2007). Applications of diamond crystal ATR FTIR spectroscopy to the characterization of ambers. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 67(5), 1407–1411. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2006.10.033>

Hatakeyama, T. & Quinn, F. (1994). *Thermal analysis: fundamentals and applications to polymer science*. John Wiley & Sons Ltd. England. 2ª edición. Pp. 38- 95.

Howie, F. (1995) Aspects of conservation of fossils resins and lignitic material. C. Collins. Oxford. Pp 47-52

La cueva del ámbar de Chiapas. (2020). Ámbar de Chiapas. Hagamos que suceda- Canal Once. <https://www.youtube.com/watch?v=2ZLBCXieftM>

Lambert, J. B., & Poinar, G. O. (2002). Amber: The organic gemstone. *Accounts of Chemical Research*, 35(8), 628–636. <https://doi.org/10.1021/ar0001970>

López, G. 2012. Caracterización óptica del ámbar de Chiapas. Diseño y construcción de un prototipo experimental para la autenticación del ámbar

Mondragón, P. (2017). *ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO PARA TODOS*.

Ragazzi, E., Roghi, G., Giaretta, A., & Gianolla, P. (2003). Classification of amber based on thermal analysis. *Thermochimica Acta*, 404(1–2), 43–54. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(03\)00062-5](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(03)00062-5)

Riquelme, F., Northrup, P., Ruvalcaba-Sil, J. L., Stojanoff, V., Peter Siddons, D., & Alvarado-Ortega, J. (2014). Insights into molecular chemistry of Chiapas amber using infrared-light microscopy, PIXE/RBS, and sulfur K-edge XANES spectroscopy. *Applied*

Physics A: Materials Science and Processing, 116(1), 97–109.
<https://doi.org/10.1007/s00339-013-8185-2>

Riquelme, F., Ruvalcaba, J. & Bucio L. (2017). Ámbar y Copal de México. Red de Ciencias Aplicadas a la Investigación y Conservación del Patrimonio. México. Pp. 5- 57.

Sandler, S., Karo, W., Bonesteel, J., Pearce, E., (1998). Polymer Syntesis and Characterization a laboratory manual,” in Thermal Analysis in Practice, 1998, pp.

108–119

White, J. E., Catallo, W. J., & Legendre, B. L. (2011). Biomass pyrolysis kinetics: A comparative critical review with relevant agricultural residue case studies. In Journal of Analytical and Applied Pyrolysis (Vol. 91, Issue 1, pp. 1–33). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.01.004>

ANEXOS

Anexo 1. Fotografías de las muestras, instrumentos y equipos.



Figura 28. Muestra de ámbar de Chiapas (Amb-01)



Figura 29. Muestra de ámbar de Chiapas (Amb-02)



Figura 30. Muestra de ámbar de República Dominicana (Amb-03)



Figura 31. Muestras pulidas de ámbar de Chiapas (Amb-04)



Figura 32. Muestra de ámbar del Báltico (Amb-05)



Figura 33. Muestra de ámbar de Chiapas (Amb-06)



Figura 34. Muestra de ámbar de Chiapas (Amb-07)



Figura 35. Muestra de ámbar de Chiapas (Amb-08)



Figura 36. Muestra falsa de ámbar (Fals-01)



Figura 37. Prueba con la lámpara de luz ultravioleta para algunas muestras falsas y reales.



Figura 38. Durómetro digital Shore D.

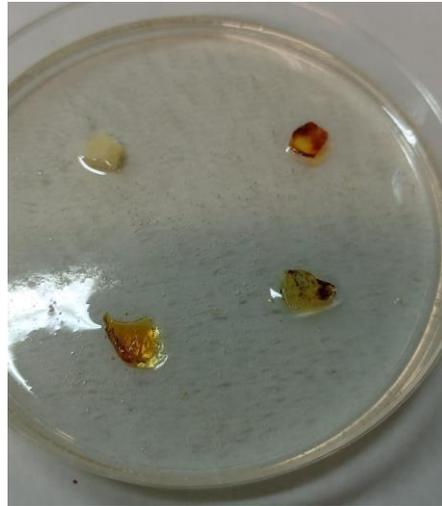


Figura 39. Muestras en poliéster para la prueba de dureza.

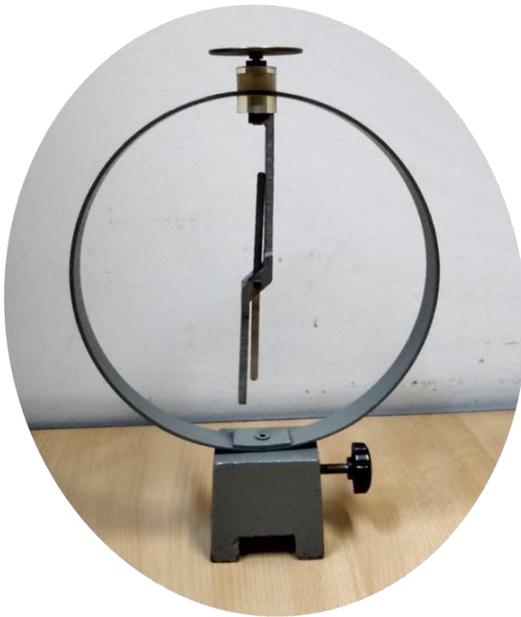


Figura 40. Electroscopio análogo.



Figura 41. Picnómetro calibrado para la prueba de densidad.

Anexo 2. Espectros de infrarrojo

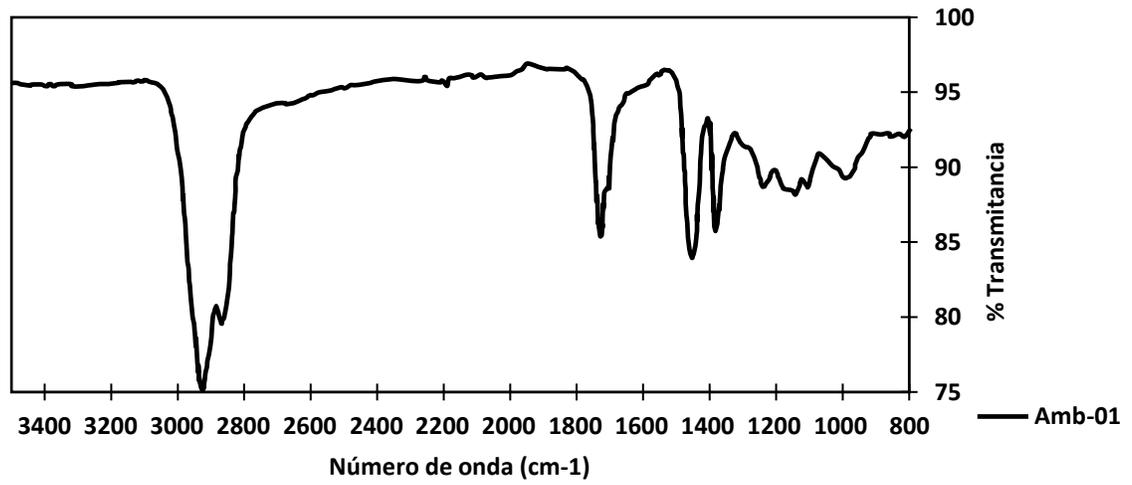


Figura 42. Espectro de infrarrojo de la muestra Amb-01

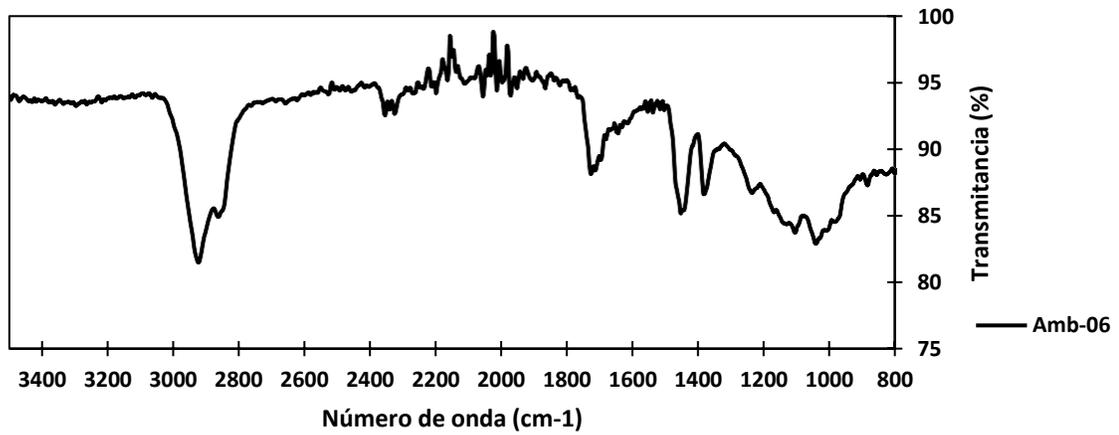


Figura 43. Espectro de infrarrojo de la muestra Amb-06.

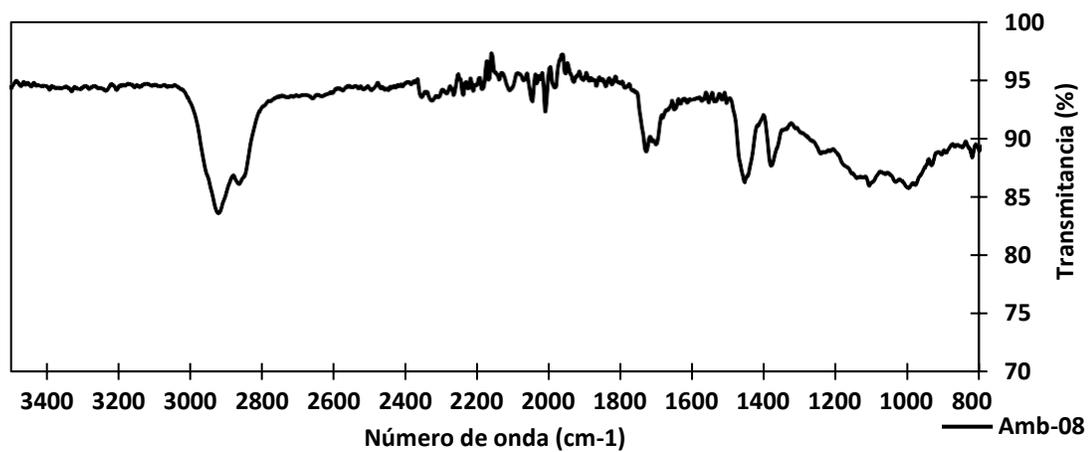


Figura 44. Espectro de infrarrojo de la muestra Amb-08.

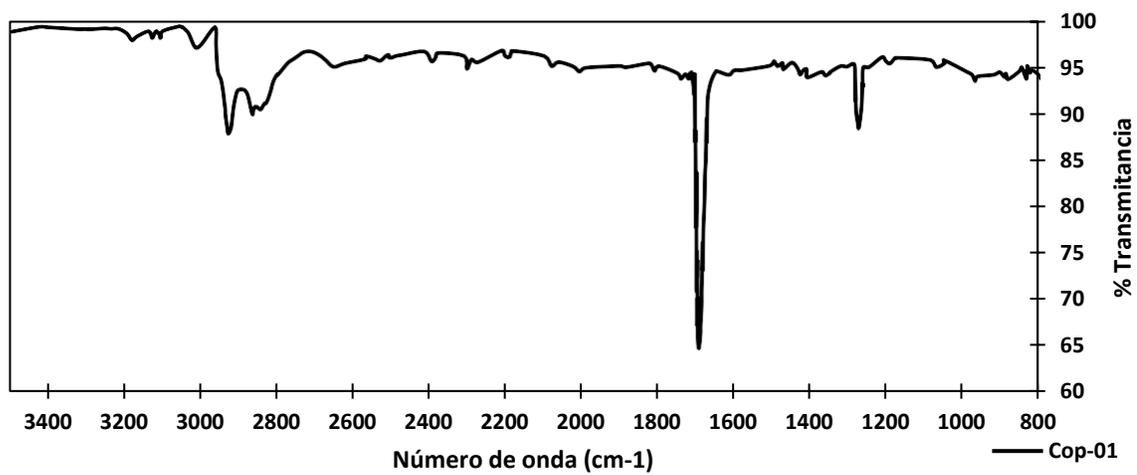


Figura 45. Espectro de infrarrojo de la muestra Cop-01.

Anexo 3. Termogramas de TGA

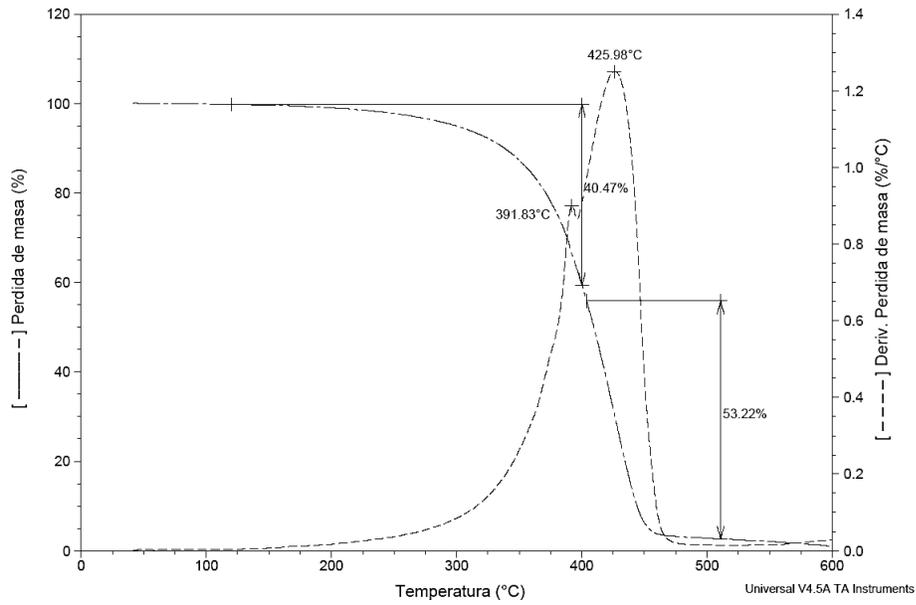


Figura 46. Termograma obtenido para la muestra Amb-06.

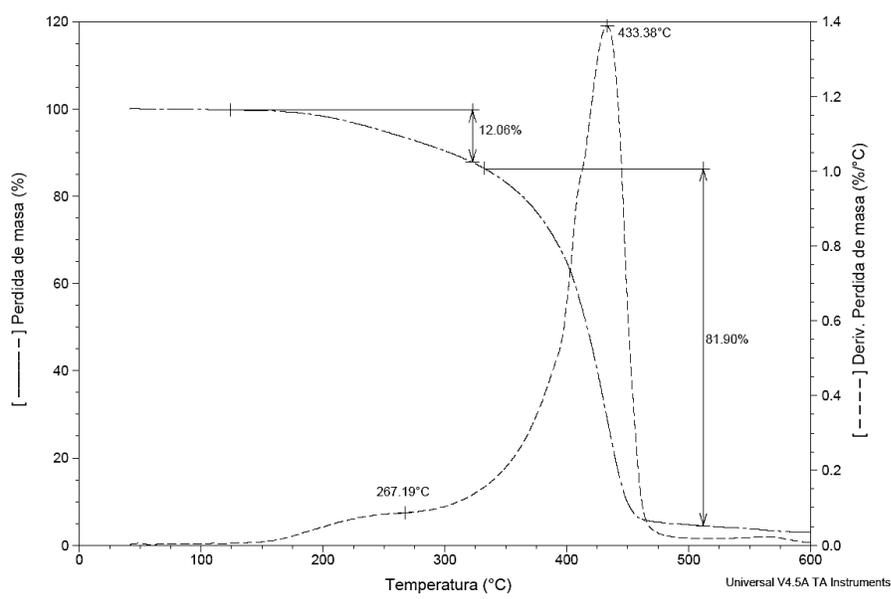


Figura 47. Termograma obtenido para la muestra de Amb-07.

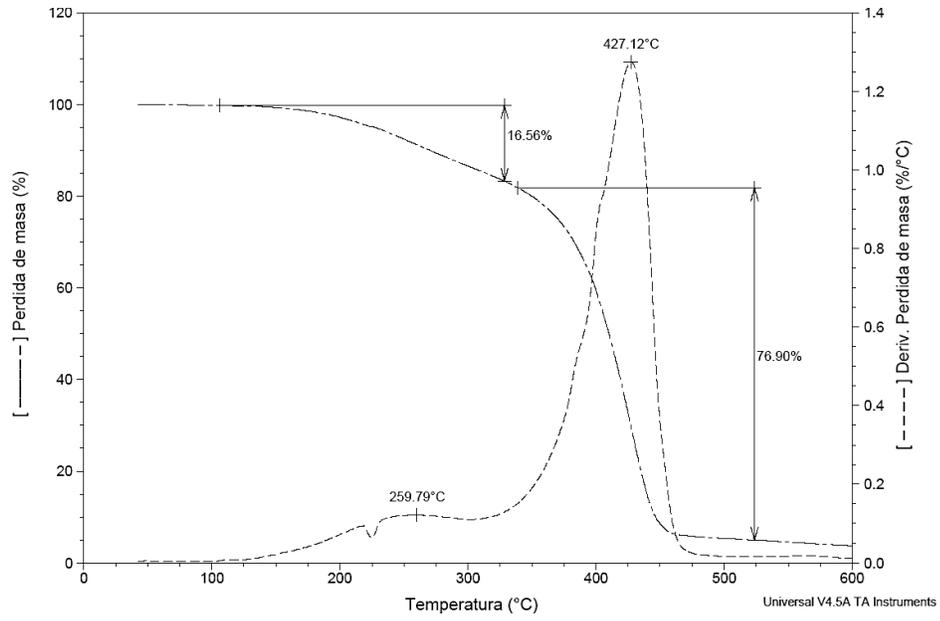


Figura 48. Termograma obtenido para la muestra Amb-08

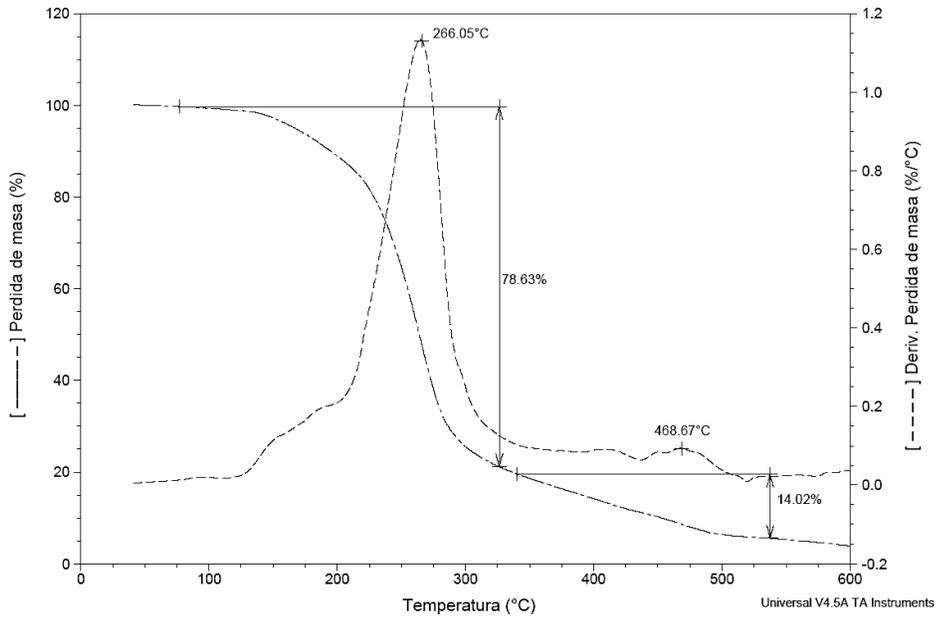


Figura 49. Termograma obtenido para la muestra Cop-01

Anexo 4. Formato en excel para la identificación visual y solubilidad en etanol.

	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	Código:	UM-Amb-F01	
	FACULTAD DE QUÍMICA	Versión:	01	
	UNIDAD DE METROLOGÍA	Fecha de emisión:	21-feb-2022	
	MÉTODO DE PRUEBA PARA LA DENOMINACIÓN DE ORIGEN: AMBAR DE CHIAPAS	Página:	1 de X	

Información de quién solicita (Nombre, dirección, e-mail, teléfono):

Clasificación. Elegir color y grado de transparencia:

Amarillo <input type="checkbox"/>	Rojo <input type="checkbox"/>	Verde <input type="checkbox"/>	Negro <input type="checkbox"/>
Claro <input type="checkbox"/>	Cereza <input type="checkbox"/>	V. Claro <input type="checkbox"/>	Café chocolate <input type="checkbox"/>
Intenso <input type="checkbox"/>	Vino <input type="checkbox"/>	V. Oscuro <input type="checkbox"/>	Lechoso <input type="checkbox"/>
Naranja <input type="checkbox"/>	Naranja <input type="checkbox"/>	V. Jaspeado <input type="checkbox"/>	Blanco <input type="checkbox"/>
Jaspeado <input type="checkbox"/>	Jaspeado <input type="checkbox"/>	Azul <input type="checkbox"/>	Transparente <input type="checkbox"/>

Apariencia

Polvo <input type="checkbox"/>	Engarzado <input type="checkbox"/>	Granel <input type="checkbox"/>
Trozos <input type="checkbox"/>	Esculpido <input type="checkbox"/>	Pulido <input type="checkbox"/>
Limpieza aparente	Lapidado <input type="checkbox"/>	Facetado <input type="checkbox"/>
Si <input type="checkbox"/>		
No <input type="checkbox"/>		

Prueba de solubilidad

Instrumento patrón y auxiliares

Instrumento	No. Informe	F. Calibración	Resolución	U máx	Unidades
Balanza	ICA.01/5403/15	2018-02-20	0.00001	0.0002	g
Termómetro	TM-0572-2018	2018-09-17	0.1	0.1	°C
Barómetro	AA2012P01	2018-12-17	0.1	0.33	hPa
Higrómetro	HU-377-2018	2018-09-18	0.1	1.71	(%)
Estufa	Sin calibrar	NA	0.1	NA	°C
Pipeta	Sin calibrar	NA	0.006	NA	mL
Cronómetro	x	x	1	x	s

Etanol

Lote:	
Marca:	
F. Caducidad:	

Los pesa filtros se pueden utilizar sin tapón ya que no son neos árticos durante la prueba.

El volumen de EtOH debe cubrir la muestra. Registrar si se percibe un cambio de volumen a los 15 min. Considerar que 1 mL de EtOH se evapora en más de 12 h.

Desecador:

Grue hermético	Si <input checked="" type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>
Silica seca	Si <input checked="" type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>

Condiciones para peso constante:
 110 °C/40 min y temperar 30 min y pesar. 110 °C/30 min y temperar 30 min y pesar.
 Criterio de aceptación: ≤ 0.5 mg/g.

¹Pesafiltros a peso constante 1

ID	M1 (g)	P (hPa)	HR (%)	T (°C)	M2 (g)	P (hPa)	HR (%)	T (°C)	M (g)	V (mL)	ΔV en 15 min
1		785.1	23.7	25.7	13.81958	785	24.3	25.9	0.09939	1	x
2		785.1	23.7	25.7	11.97961	785	24.3	25.9	0.09598	1	x
3		785.1	23.7	25.7	11.74627	785	24.3	25.9	0.10243	1	x

²Masa de la muestra y V EtOH agregado

Pesafiltros a peso constante después de la evaporación de EtOH

ID	M1 (g)	P (hPa)	HR (%)	T (°C)	M2 (g)	P (hPa)	HR (%)	T (°C)	%	U (k=2)	Umple
1		780.9	24.9	26.1	13.92286				0.10328	103.9139	0.35
2		780.9	24.9	26.1	12.07905				0.09944	103.6049	0.37
3		780.9	24.9	26.1	11.8534				0.10713	104.5885	0.34
									104.04		0.35

Realizó (Nombre, firma y fecha):
 Revisó (Nombre, firma y fecha):

Figura 50. Formato de Excel para la prueba de identificación visual y solubilidad en etanol.

Anexo 5. Cartas de trazabilidad

