



T E S I S

**Como requisito para obtener el grado académico de:
MAESTRÍA EN OPTOMECASTRÓNICA**

**Tesis presentada por:
ING. GUADALUPE LÓPEZ MORALES**

**Con el tema:
“CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DEL ÁMBAR DE
CHIAPAS. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN
PROTOTIPO EXPERIMENTAL PARA LA
AUTENTIFICACIÓN DEL ÁMBAR”**

**Asesores de tesis:
DR. RAFAEL ESPINOSA LUNA
DR. CLAUDIO FRAUSTO REYES**

LEÓN, GUANAJUATO

SEPTIEMBRE DE 2012

DEDICATORIA.

Dedico este triunfo a mis padres, José Ángel y María Elena, quienes me brindaron, en todo momento, el amor y apoyo necesario para superar las adversidades y así poder culminar mis estudios de Maestría. Fueron las personas que me alentaron día con día para superarme como persona y como estudiante.

Este éxito en mi vida va dedicado a ellos con todo el amor de mi corazón.

Guadalupe López Morales.

AGRADECIMIENTOS.

Deseo expresar de todo corazón mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que me brindaron su colaboración, sus conocimientos, su ayuda incondicional y por sobre todo su amistad durante la realización de esta investigación.

Primero que todo le agradezco a Dios, por regalarme los dones de la sabiduría y del entendimiento y, por darme las fuerzas para seguir adelante a pesar de todas las adversidades que he tenido. Gracias por darme el valor para seguir adelante y cumplir mis sueños.

A mi familia, que siempre estuvieron pendientes de mí, por tomarme en cuenta en sus oraciones, por el apoyo moral y económico y, porque nunca me hizo falta su cariño. Porque si estoy donde estoy es gracias a ellos.

A mis amigos de la secundaria (*VLF'S*) que siempre estuvieron conmigo para echarme porras cuando veía lejos el final y la desesperación me invadía.

A mi amiga Yuly que fue la persona que me motivó a aventurarme, junto con ella, a continuar con la maestría aunque estuviéramos lejos de casa.

Al grupo de trabajo del laboratorio de GIPYS y a mis compañeros del CIO, gracias por los momentos de charla en que siempre me ayudaron a ver los problemas con un enfoque positivo. Sé que sin su apoyo y compañía mi estancia en la maestría no hubiese sido la misma. Gracias porque estuvieron conmigo y compartimos tantas aventuras, experiencias y desveladas.

A todas esas personas que han aparecido de manera inesperada en mi camino y que han dejado una huella imborrable en mi vida. Gracias por sus consejos, por escucharme, por estar ahí cuando debo tomar decisiones importantes, por compartir un poco de sus vidas conmigo y por alegrarme el día con su presencia.

Al proyecto CONACYT 100361 y al CONACYT por otorgarme una beca para la realización de mis estudios de Maestría.

Al Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) por permitirme hacer uso de sus instalaciones y equipo para la realización de mi tesis. Agradezco a los doctores del CIO por la formación académica y personal recibida durante mi desarrollo profesional durante la

maestría. Un agradecimiento especial al Dr. Rafael Espinosa Luna y al Dr. Claudio Frausto Reyes, asesores de la tesis, por su total apoyo en la realización de la presente tesis. Gracias por brindarme sus valiosos aportes, dedicación constante, confianza depositada en mí y por enseñarme que no sólo hay conocimiento, sino también hay lazos de amistad y personas de gran calidad humana.

También agradezco por su colaboración desinteresada en mi trabajo de tesis al Dr. Gabriel Ramos Ortiz, a la M. C. Diecenia Peralta Domínguez, al Dr. Sergio A. Calixto Carrera, al técnico del taller óptico Alfredo Hernández Vilches, al M. C. Ricardo Valdivia Hernández, al M. C. Gil A. Pérez Herrera, al M. C. Orlando Miguel Medina Cázares y a la M. C. Karla M. Salas Alcántara.

A todos ustedes, muchas gracias...

Resumen

Se realizó una caracterización óptica a muestras de ámbar de Chiapas, ámbar del Báltico y a muestras falsas de ámbar, con el objetivo de discriminar entre muestras genuinas y falsas. Se buscó identificar las variables físicas que pudieran servir como fundamento para el desarrollo de un dispositivo cuya operación fuese capaz de discriminar entre muestras de ámbar genuinas y falsas.

Para ello se determinó su índice de refracción mediante las técnicas de espectroelipsometría, de refractometría de Abbe y de Esparcimiento Resuelto Angularmente (ARS). De manera similar, se determinó su respuesta espectral Raman y fluorescente. Los resultados obtenidos permiten concluir que el índice de refracción no es una variable robusta capaz de diferenciar muestras genuinas de muestras falsas. En cambio, tanto los espectros Raman como los asociados a la fluorescencia brindan información que permite discriminar entre ambos tipos de muestras. Por esta razón se utilizaron los resultados obtenidos por fluorescencia como fundamento para el diseño y construcción de un prototipo sencillo, confiable, portable y económicamente accesible para la autenticación del ámbar, a nivel comercial.

ÍNDICE

Capítulo 1 Introducción.

1.1. Planteamiento del problema.	1
1.2. Estado del arte.....	3
1.3. Justificación.	4
1.4. Objetivo de la investigación.	5
1.4.1. Objetivo general.	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	5
1.5. Metas.....	5

Capítulo 2 Principios de óptica.

2.1. La luz.....	6
2.1.1. Propagación de la luz.	6
2.1.1.1. Propagación de ondas unidimensionales.....	6
2.1.1.2. Ondas electromagnéticas.....	8
2.1.2. Índice de refracción.	9
2.1.3. Dieléctricos.....	11
2.1.3.1. Polarización dieléctrica.....	11
2.1.3.2. Constante dieléctrica.....	11
2.2. Polarización de la luz.	12
2.2.1. Representación de los estados de polarización de la luz.	13
2.2.2. Vectores de Stokes.....	14
2.2.3. Polarización elíptica.	14
2.2.4. Representación de la polarización mediante la esfera de Poincaré.....	15
2.2.5. Matriz de Mueller.	17
2.2.6. Métricas de polarización.....	18
2.3. Elipsometría Espectroscópica.....	20
2.3.1. Parámetros elipsométricos.	21
2.3.2. Efecto de despolarización de las muestras.....	22
2.3.3. Análisis de datos.	23
2.3.3.1. Aproximación del medio efectivo.	23
2.4. Ángulo crítico y ángulo de Brewster.	23
2.4.1. Refractómetro de Abbe	26
2.4.2. Esparcimiento resuelto angularmente	27

2.5. Espectroscopia Raman.	27
2.5.1. Fundamentos de espectroscopia Raman.....	27
2.5.2. Fluorescencia.	31

Capítulo 3 Materiales y métodos.

3.1. Preparación de muestras.	32
3.2. Medición del índice de refracción del ámbar de Chiapas.	32
3.2.1. Espectroelipsómetro.....	32
3.2.1.1. Equipo.....	32
3.2.1.2. Metodología.	33
3.2.2. Refractómetro de Abbe.	34
3.2.2.1. Equipo y calibración.	34
3.2.2.2. Metodología.	35
3.2.3. Esparcimiento resuelto angularmente para la determinación del ángulo de Brewster.	36
3.2.3.1. Equipo.....	36
3.2.3.2. Metodología.	36
3.3. Espectroscopia Raman.	37
3.3.1. Sistemas Raman.	37
3.3.2. Medición y preparación de espectros Raman.	39
3.3.3. Procesamiento de datos.	39
3.4. Espectro de emisión de fluorescencia.....	40
3.4.1. Equipo	40
3.4.2. Metodología.....	40

Capítulo 4 Resultados y discusiones.

4.1. Medición del índice de refracción.....	41
4.1.1. Espectroelipsometría.....	41
4.1.2. Refractómetro de Abbe.	43
4.1.3. Esparcimiento resuelto angularmente para la determinación del ángulo de Brewster.	43
4.2. Espectroscopia Raman.	44
4.2.1. Ámbar de Chiapas.	45
4.2.1.1. Maduración del ámbar.	48
4.2.1.2. Degradación del ámbar.	50
4.2.2. Ámbar del Báltico.....	50

4.2.3. Muestras de ámbar falso.....	51
4.2.4. Comparación del ámbar de Chiapas, ámbar del Báltico y ámbar falso.....	52
4.2.5. Comparación con base de datos de espectros de moléculas biológicas.....	53
4.3. Espectro de emisión de fluorescencia.....	56
4.3.1. Fuente de excitación: Láser UV.....	56
4.3.2. Fuente de excitación: Láser de Argón.....	57

Capítulo 5 Conclusiones.

5.1. Medición del índice de refracción.....	58
5.2. Espectroscopia Raman.....	58
5.3. Espectro de emisión de fluorescencia.....	60

Capítulo 6 Plan de negocios: Diseño y desarrollo del prototipo.

6.1. Descripción general del proyecto de investigación.....	61
6.1.1. Naturaleza del proyecto de investigación.....	61
6.2. Organización.....	62
6.2.1. Misión.....	62
6.2.2. Visión.....	62
6.2.3. Objetivo.....	62
6.2.4. Estudio técnico del proyecto.....	62
6.2.5. Ventajas competitivas.....	62
6.2.6. Estructura del negocio.....	63
6.3. Mercadotecnia.....	64
6.3.1. Objetivo de investigación y necesidades de información.....	64
6.3.2. Estrategias competitivas.....	64
6.3.3. Segmentación de mercados y perfiles de clientes.....	64
6.3.4. Mezcla de la mercadotecnia utilizando las (4P'S).....	65
6.3.5. Competencias.....	65
6.3.6. Publicidad.....	65
6.3.7. Comercialización.....	65
6.4. Finanzas.....	66
6.4.1. Objetivo y estudio financiero.....	66
6.4.2. Fuentes de uso de dinero en efectivo.....	66

6.4.3. Cálculos estimativos de gastos y costos para iniciar el negocio.....	66
6.5. Conclusiones.....	67
6.5.1. Viabilidad del proyecto de investigación.	67
6.5.2. Conclusiones generales.....	67
6.6. Diseño del prototipo experimental para verificar la autenticidad del ámbar de Chiapas.	67
6.6.1. Fuente de iluminación.	67
6.6.2. Selección del sensor.....	69
6.6.3. Acondicionamiento de la señal.....	71
6.6.4. Procesamiento de datos: Microcontrolador.	73
6.6.5. Fuente de alimentación del circuito.	73
Capítulo 7 Sugerencias. Trabajo a futuro.....	74
Anexos	
Anexo A Fotografía de las muestras de ámbar de Chiapas, del Báltico y muestras falsas.....	75
Anexo B Espectros Raman del ámbar de Chiapas y del Báltico.....	82
Anexo C Reseña: Visita a la mina Pocitos en la ciudad de Simojovel de Allende, Chiapas.....	92
Anexo D Presentación de resultados en Congresos.	101
Bibliografía.....	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2 Principios de óptica.

Fig. 2.1	Onda unidimensional que viaja en el eje x con una velocidad s	7
Fig. 2.2	Propagación de una onda electromagnética.	8
Fig. 2.3	Estados de polarización de la luz.	13
Fig. 2.4	Esfera de Poincaré.	15
Fig. 2.5	Principio de medición en elipsometría.	21
Fig. 2.6	Factores que generan la despolarización de la luz.	22
Fig. 2.7	Haz de luz reflejado y refractado (transmitido) en la frontera entre dos índices de refracción n_1 y n_2	24
Fig. 2.8	Ángulo crítico.	25
Fig. 2.9	Luz polarizada paralela incidente al ángulo de Brewster.	25
Fig. 2.10	Sección transversal de una parte del camino óptico de un refractómetro de Abbe.	27
Fig. 2.11	Diagrama energético.....	28

Capítulo 3 Materiales y métodos.

Fig. 3.1	Espectroelipsómetro.....	33
Fig. 3.2	Muestra de ámbar posicionada en la platina del espectroelipsómetro.....	34
Fig. 3.3	Línea divisoria centrada.	35
Fig. 3.4	Arreglo experimental para encontrar el ángulo de Brewster.....	36
Fig. 3.5	Equipo Raman comercial	37
Fig. 3.6	Sistema Raman Convencional.....	38
Fig. 3.7	Arreglo utilizado para medir el espectro de emisión fluorescente del ámbar	40

Capítulo 4 Resultados y discusiones.

Fig. 4.1 Curva de dispersión para el índice de refracción, parte real e imaginaria, del ámbar de Chiapas.....	42
Fig. 4.2 Espectro Raman del ámbar de Chiapas en el rango de 200-2000 cm^{-1}	45
Fig. 4.3 Espectro Raman del ámbar de Chiapas en el rango de 2500 -3700 cm^{-1}	47
Fig. 4.4 Razón de intensidades de los picos centrados en 2873 cm^{-1} y 2926 cm^{-1}	47
Fig. 4.5 Maduración. Razón de intensidades I_{1650}/I_{1440}	49
Fig. 4.6 Razón de intensidades en la banda de 556 cm^{-1} y 720 cm^{-1}	49
Fig. 4.7 Degradación de las muestras. Razón de intensidades I_{1724}/I_{1650}	50
Fig. 4.8 Espectro Raman correspondiente al ámbar del Báltico.	51
Fig. 4.9 Espectro Raman correspondiente a muestras de ámbar falso.....	52
Fig. 4.10 Comparación del espectro Raman de una muestra de ámbar de Chiapas, del Báltico y ámbar falso.....	52
Fig. 4.11 Comparación del espectro Raman del ámbar de Chiapas con el ácido Oleico.	53
Fig. 4.12 Comparación del espectro Raman del ámbar de Chiapas con el ácido Vaccénico.	54
Fig. 4.13 Comparación del espectro Raman del ámbar de Chiapas con el graso Trioleina.	54
Fig. 4.14 Comparación del espectro Raman del ámbar de Chiapas con el graso Trilinoleina.	55
Fig. 4.15 Comparación del espectro Raman del ámbar de Chiapas con el graso Trilinolenin.	55
Fig. 4.16 Comparación del espectro Raman del ámbar de Chiapas con el ácido Succínico.....	56
Fig. 4.17 Espectro de emisión de fluorescencia de las muestras de ámbar excitadas a 370 nm.....	57
Fig. 4.18 Espectro de emisión de fluorescencia de las muestras de ámbar excitadas a 457 nm.....	57

Capítulo 6 Plan de negocios: Diseño y desarrollo del prototipo.

Fig. 6.1	Efecto de fluorescencia en el ámbar de Chiapas.	68
Fig. 6.2	Espectro de emisión de dos LEDs (fuente de iluminación).....	68
Fig. 6.3	LED azul brillante.....	69
Fig. 6.4	Circuito electrónico de la parte de fuente de iluminación	69
Fig. 6.5	Espectro de emisión de diferentes LEDs para determinar su uso como sensores de fluorescencia.	70
Fig. 6.6	LED verde difuso	70
Fig. 6.7	Etapa de sensado.	71
Fig. 6.8	Convertidor de corriente a voltaje.....	71
Fig. 6.9	Amplificador no inversor de voltaje..	72

Anexos C

Fig. C.1	Camino hacia la mina Pocitos en la Ciudad de Simojovel de Allende	95
Fig. C.2	Veta de ámbar.....	95
Fig. C.3	Estructura interna de la mina Los Pocitos.	96
Fig. C.4	Derrumbe de una mina.....	96
Fig. C.5	Extracción de ámbar.	97
Fig. C.6	Pieza de ámbar incrustado en la pared de la mina.....	97
Fig. C.7	Pieza de ámbar sin pulir.....	98
Fig. C.8	Lijado de una pieza de ámbar.	99
Fig. C.9	Pulido de una pieza de ámbar.	99
Fig. C.10	Ámbar lijado y pulido.....	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Ángulo de Brewster e índice de refracción	43
Tabla 4.2. Bandas Raman e intensidad para la muestra de ámbar A.	48
Tabla 6.1 Estudio técnico del producto.....	62
Tabla 6.2 Descripción del puesto: Titular del proyecto de tesis.	63
Tabla 6.3 Descripción del puesto: Asesor del proyecto de tesis.....	63
Tabla 6.4 Mercadotecnia utilizando las 4P's.....	65
Tabla 6.5 Lista de precios.	66
Tabla C.1 Especificaciones fisicoquímicas del ámbar de Chiapas.	94

Capítulo 1

Introducción.

En esta tesis se presenta un estudio para la caracterización de las propiedades ópticas del ámbar de Chiapas, utilizando técnicas ópticas como la espectroelipsometría y la espectroscopia Raman. Se tiene como uno de sus objetivos la obtención de información necesaria para el diseño y construcción de un prototipo experimental que sirva para comprobar, de manera confiable y sencilla, la autenticidad del ámbar de Chiapas. Para el desarrollo de un prototipo (patentable), también se realizaron pruebas sobre la fluorescencia asociada a muestras de ámbar auténtico e imitaciones.

La organización de la tesis es la siguiente:

En el capítulo 2 se describen los principios de óptica afines con la metodología de las técnicas ópticas implementadas para caracterizar el ámbar. Se presentan tópicos que están estrechamente relacionados con los métodos utilizados en la determinación del índice de refracción, así como los fundamentos de espectroscopia Raman y de fluorescencia de las muestras de ámbar.

En el capítulo 3 se encuentra la metodología experimental de cada prueba realizada. Se mencionan las condiciones de las muestras bajo las cuales se realizaron las mediciones. Además, se describe el equipo utilizado y el procedimiento que se llevó a cabo para efectuar la medición del índice de refracción utilizando el espectroelipsómetro, el refractómetro de Abbe y el Esparcimiento Resuelto Angularmente (ARS) para la determinación del ángulo de Brewster; así como la descripción de los sistemas Raman utilizados y el desarrollo de las mediciones y procesamiento de datos asociados a su espectro. Se describe el sistema utilizado para la medición de la fluorescencia.

En el capítulo 4 se muestran y discuten los resultados obtenidos para el valor del índice de refracción por los diferentes métodos implementados. Se describen los modos de vibración que corresponden a los picos más pronunciados del espectro Raman y en base a ellos se obtuvo el grado de madurez y degradación que tiene cada muestra. Además, se hace un comparativo del espectro Raman de una muestra de ámbar de Chiapas, una del Báltico y una muestra falsa. Se presentan los resultados de la emisión fluorescente.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones de las metodologías empleadas.

En el capítulo 6, basado en los resultados de la respuesta fluorescente del ámbar auténtico y de muestras falsas, se describe el diseño de la parte electrónica y óptica del prototipo experimental. Se presentan los componentes electrónicos empleados para la construcción del diseño, así como las pruebas realizadas para corroborar el buen funcionamiento del prototipo.

En el capítulo 7 se mencionan las sugerencias del trabajo a futuro. En base a los resultados obtenidos se hace una propuesta para la mejor determinación y aplicación de la Norma Oficial Mexicana del Ámbar de Chiapas (NOM-152-SCFI-2003).

Se han agregados anexos en los que se presentan las fotografías y los espectros Raman de las muestras de ámbar de Chiapas, ámbar del Báltico y muestras falsas, el trabajo de campo realizado en una mina chiapaneca, así como un anexo donde se expone brevemente la presentación de los resultados obtenidos en diversos congresos.

1.1. Planteamiento del problema.

El ámbar es de los pocos materiales de joyería aún no explotado comercialmente en el grado que corresponde a su potencial estético, se considera como la única piedra preciosa y semi-preciosa de origen vegetal que pertenece al grupo de las gemas orgánicas como el azabache, las perlas, los corales, entre otros.

Aunque existen otros países en donde se ha encontrado ámbar, los de mejor calidad son los de México y de República Dominicana (por su alta transparencia, variedad en color y alto índice de refracción). En México, el ámbar se localiza en el Estado de Chiapas en los municipios de Simojovel de Allende, Huitiupan, Totolapa, El Bosque, Pueblo Nuevo Solistahuacan, Pantelho y San Andrés Durazanal.

Después de ser extraído de la mina, los artesanos y escultores, procesan el ámbar en bruto, convirtiéndolo en una gran variedad de joyería montada en materiales preciosos y esculturas de ámbar de alta calidad; existen piezas de ámbar que tienen un alto valor científico por sus inclusiones de flora, insectos e incluso ranas y lagartijas ya extintos.

La importancia que tiene a nivel comercial es en la joyería. El precio de esta joya depende del tipo de tallado, el color, tonalidad, inclusiones y montado que presente. Hoy en día, existe en el comercio la falsificación de dichas piedras y esto afecta directamente a

la economía de los artesanos que extraen y procesan el ámbar. Esto trae consigo un desprestigio al ámbar, pues el consumidor los adquiere con desconfianza, ya que no existe un medio accesible y confiable para la autenticación de su origen.

1.2. Estado del arte.

Actualmente, no se tiene una amplia investigación en lo que respecta a la caracterización de las propiedades ópticas del ámbar de Chiapas. En el Diario Oficial de la Federación se encuentra publicado la norma, NOM-152-SCFI-2003, la cual aún no entra en vigor debido a que no se ha concluido la acreditación de un Organismo Certificador. En dicha norma se describe las especificaciones y métodos de prueba que debe cumplir el ámbar de Chiapas durante su extracción, elaboración y verificación, para las cuales se necesitan de varios equipos costosos, lo que hace difícil su acceso a los artesanos y a los consumidores que requieran verificar la autenticidad del ámbar.

Se han realizado estudios para la obtención de espectros de vibración del ámbar. En ellos se presenta un estudio teórico de los espectros IR de algunas muestras de ámbar, que han sido comparados con el espectro obtenido teóricamente para un modelo de este polímero natural [1]. En el trabajo citado, la metodología de la estructura electrónica se consideró apropiada para el estudio y racionalización de los espectros de las muestras elegidas de ámbar, dichos resultados coinciden con el espectro observado. La prueba se realizó para cuatro muestras de ámbar provenientes de diferentes países: República Dominicana, México, Colombia y Mar Báltico.

Se tiene información sobre la geología de los yacimientos de ámbar de las Antillas [2]. Este artículo menciona el origen del ámbar como la consecuencia de los cambios diagenéticos que operan en la resina después del entierro de la pila sedimentaria, a veces a más de 1,000 metros de profundidad, donde es sometido a altas temperaturas y presión durante millones de años.

En el área de espectroscopia Raman, se han realizado estudios a muestras de resinas fósiles, entre las que se encuentra el ámbar. Las muestras estudiadas fueron extraídas de minas de México, Rusia, Colombia, República Dominicana, Alemania, Polonia, Rumania, entre otros. Los estudios han sido enfocados a conocer la composición química, determinar la diferencia entre muestras de copal o ámbar y los factores que afectan en la maduración de las muestras [3-4]. Una resina fósil se refiere a una resina con un determinado nivel de maduración. Ámbar y copal son términos utilizados para describir resinas fósiles; la primera se refiere a muestras con mayor maduración, mientras que las resinas más recientes, por lo general de hasta 2 millones de años, corresponden a copal.

Maduración es un proceso complejo, que implica cambios químicos en la muestra, que ocurre durante el enterramiento para transformar la resina en copal o ámbar. Los cambios son debidos a los procesos de oxidación, que ocurren en la estructura del diterpenoide que es el componente principal del ámbar y del copal. Estos cambios se originan de las condiciones en el ambiente geológico; es decir, en los niveles de temperatura, presión y agua. El grado de maduración de una muestra depende tanto de las condiciones térmicas así como del tiempo de enterramiento.

Estudios anteriores han determinado que el espectro de una resina fósil tiene dos picos muy pronunciados, centrados en 1640 cm^{-1} y el otro en 1440 cm^{-1} . La razón de las intensidades (I_{1640}/I_{1440}) de estos picos es un indicador para conocer la maduración de las muestras. Una resina con poca maduración (unos cuantos miles de años) presenta un pico con mayor intensidad en 1640 cm^{-1} que en 1440 cm^{-1} (una razón de 1.7 corresponde a una resina de pino muy reciente) en comparación de una resina fósil, la cual tienen una razón entre 0.7 y 1.0 para una muestra de copal, y una razón de intensidades menor a 0.6 corresponde a una muestra de ámbar [4]. Esto lo atribuyen por el hecho de pérdida de insaturación $\nu(\text{C}=\text{C})$ debido a la degradación de la resina fósil y, como una consecuencia en la química del material, una intensidad más baja en la banda en 1640 cm^{-1} (debido al número reducido de enlaces olefínicos) es considerada para determinar el grado de polimerización de una resina. El uso de la razón de intensidades I_{1640}/I_{1440} como una estimación de la maduración es apropiado cuando la muestra contiene componentes diterpenoide.

1.3. Justificación.

Para que una pieza de ámbar llegue a los aparadores de una joyería debe pasar por un largo proceso de elaboración. Primero se encuentra la extracción del ámbar en minas que se encuentran en sitios de difícil acceso debido a procesos erosionales, por lo que están expuestas a peligrosos derrumbes; cabe mencionar que actualmente los trabajos que se realizan no emplean tecnología alguna más allá de cincel y marro. Una vez extraída la pieza de la mina, se pasa a la etapa de pulido en donde se selecciona, limpia y pule manualmente la pieza de ámbar. Por último se tiene la parte de diseño y terminado de la pieza, en la cual el artesano le da forma, de acuerdo al tamaño, y también le da un brillo particular (utilizando franela) para quitar el exceso de impurezas generadas por el tallado de dicha piedra. Todo este proceso le da un escaso valor a cada una de las piezas de

ámbar que se encuentran en el comercio y por ello se busca la manera de hacer valer el esfuerzo que dedica cada artesano a este proceso.

Uno de los problemas que presenta el ámbar en su comercialización es la competencia desleal ante la falsificación de esta joya. Existen métodos caseros para comprobar la originalidad del ámbar pero estas pruebas son destructivas y subjetivas (se les quema y si huele a copal o incienso, se comprueba que la pieza corresponde a ámbar auténtico).

El desarrollo de un prototipo portable, confiable y económicamente accesible le dará un valor agregado a la comercialización del ámbar, que tanto prestigio y promoción mundial le han dado al Estado de Chiapas y a nuestro país, coadyuvando así al posicionamiento del ámbar de Chiapas en los mercados nacionales e internacionales.

1.4. Objetivo de la investigación.

1.4.1. Objetivo general.

Caracterización de la respuesta óptica que presentan las muestras de ámbar de Chiapas.

1.4.2. Objetivos específicos.

Diseño y construcción de un prototipo experimental sencillo, económico, robusto y portable para la autenticación del ámbar.

1.5. Metas.

- Incorporar el dispositivo al mercado productivo.
- Para alcanzar esta meta se buscará patentar el dispositivo diseñado y ofrecer el producto a empresas, asociaciones o personas que estén interesadas en la adquisición de dicho prototipo.

Capítulo 2

Principios de óptica.

2.1. La luz.

Se sabe que la luz es una radiación electromagnética (EM). La luz es energía y el fenómeno del color es producto de la interacción de la energía y la materia. Las ondas electromagnéticas existen como consecuencia de dos efectos: un campo magnético variable genera un campo eléctrico y un campo eléctrico variable produce un campo magnético. Las ondas electromagnéticas en el espacio vacío consisten en campos eléctricos y magnéticos oscilatorios que mantienen su perturbación en ángulo recto (perpendiculares) entre sí y también son perpendiculares (ángulo recto) a la dirección de propagación de la onda. En concreto, las ondas electromagnéticas son por naturaleza transversales.

2.1.1. Propagación de la luz.

2.1.1.1. Propagación de ondas unidimensionales.

El comportamiento de una onda de luz que avanza con respecto al tiempo se puede expresar por medio de una onda unidimensional; es decir, como una onda que se propaga en una sola dirección, respecto a un sistema de coordenadas cartesiano ortogonal. Una onda en la posición x antes de la propagación se representa por la ecuación (2.1),

$$\varphi = A \operatorname{sen} Kx \quad (2.1)$$

donde A es la amplitud de la onda y K es el número de propagación que se define en la ecuación (2.2),

$$K = 2\pi/\lambda \quad (2.2)$$

donde λ es la longitud de onda. Entonces, K representa el número de ondas sinusoidales presentes en una distancia de 0 a 2π radianes. En general, el número de propagación se denota como k . Sin embargo, como el índice de refracción complejo se define usando k , el número de propagación se denotará como K [5].

En la figura 2.1, se muestra una onda que se propaga con una velocidad s y se mueve una distancia st a lo largo del eje x después de un tiempo t . Introduciendo un nuevo sistema de coordenadas $x' - \varphi'$, de tal forma que la onda se mueva de manera idéntica a la anterior, la onda es expresada por $\varphi' = A \sin Kx'$. Por tanto, en la ecuación (2.3) se expresa la onda unidimensional que viaja a una velocidad s ,

$$\varphi = A \text{ sen } K(x - st) \quad (2.3)$$

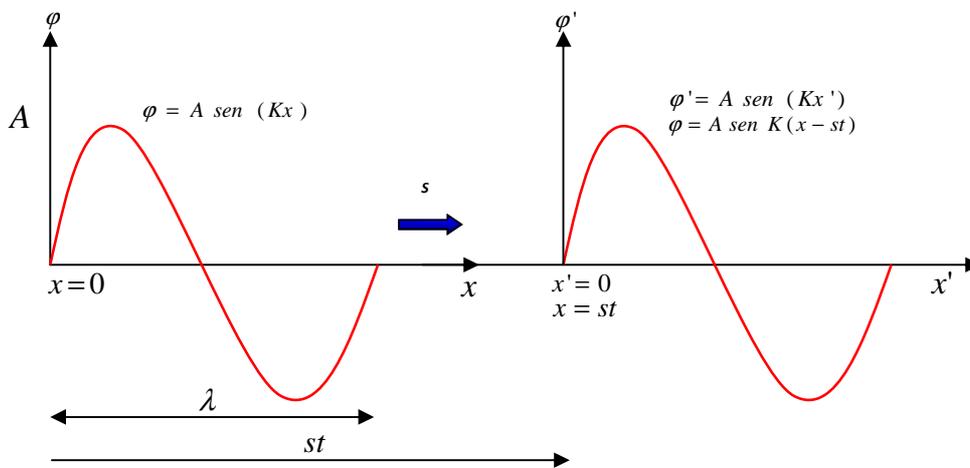


Fig. 2.1 Onda unidimensional que viaja en el eje x con una velocidad s .

El tiempo necesario para viajar una distancia λ está dado por la ecuación (2.4),

$$\tau = \lambda/s \quad (2.4)$$

donde τ se refiere a un periodo temporal. La frecuencia ν y la frecuencia angular ω se definen por las ecuaciones (2.5) y (2.6), respectivamente,

$$\nu \equiv 1/\tau \quad (2.5)$$

$$\omega \equiv \frac{2\pi}{\tau} = 2\pi\nu \quad (2.6)$$

Similarmente para K , ω representa el número de ondas en un lapso de tiempo 2π . Reescribiendo la ecuación (2.3), usando las ecuaciones (2.2), (2.4) y (2.6), se obtiene la propagación de la onda unidimensional expresado en la ecuación (2.7),

$$\varphi = A \text{ sen}(Kx - \omega t) \quad (2.7)$$

Una onda sinusoidal que se mueve a lo largo de la dirección positiva del eje x con incrementos en t se presenta como una función periódica de x y t en el plano $x - t$. La velocidad de la onda se representa en la ecuación (2.8),

$$s = \frac{\lambda}{\tau} = \lambda\nu = \frac{\omega}{K} \quad (2.8)$$

Cuando las ondas de luz se reflejan en un medio, la fase ($Kx - \omega t$) generalmente presenta un gran cambio. Para expresar este fenómeno, se introduce la fase inicial δ en la ecuación (2.7).

$$\varphi = A \text{sen}(Kx - \omega t + \delta) \quad (2.9)$$

En la ecuación (2.9), cuando $\delta = \pi/2$, una onda sinusoidal se convierte en una onda cosenoidal ya que $\text{sen}(x + \pi/2) = \text{cos } x$.

También se puede presentar una onda sinusoidal como en la ecuación (2.10),

$$\varphi = A \text{cos}(\omega t - Kx + \delta) = \text{Re} \{A \exp[i(\omega t - Kx + \delta)]\} \quad (2.10)$$

Simplificando se obtiene la ecuación (2.11); es común representar una onda monocromática en notación compleja, para efectos de facilitar su manipulación algebraica, pero sin olvidar que la parte real es a la que se le asocia el sentido físico en el cálculo final del procedimiento empleado.

$$\varphi = A \exp[i(\omega t - Kx + \delta)] \quad (2.11)$$

2.1.1.2. Ondas electromagnéticas.

La figura 2.2 muestra la propagación de una onda electromagnética, donde se muestra el campo eléctrico \mathbf{E} y magnético \mathbf{B} .

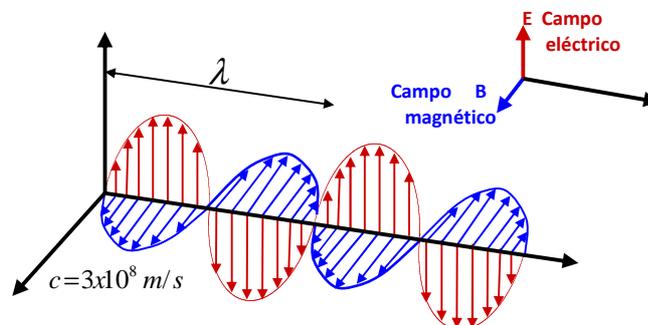


Fig. 2.2 Propagación de una onda electromagnética.

Una onda electromagnética puede ser tratada como una onda unidimensional, empleando una rotación apropiada del sistema de referencia. Utilizando la notación exponencial para las ondas armónicas, se tiene las ecuaciones (2.12) y (2.13) [6],

$$E = E_0 \exp[i(\omega t - Kx + \delta)] \quad (2.12)$$

$$B = B_0 \exp[i(\omega t - Kx + \delta)] \quad (2.13)$$

Una onda de luz es la representación estadística de millones de fotones, cuando se conoce como la forma continua de la luz muestra un carácter ondulatorio; si se representan sólo unos cuantos fotones, se manifiesta el carácter discreto o corpuscular (de partícula) de la luz. Entonces, dependiendo del número de fotones se tiene una manifestación ondulatoria o una manifestación corpuscular. Einstein propuso la teoría en donde trata a la luz como partículas de energía, conocidos como fotones. Cuando la luz se trata como un fotón, la energía del fotón está dada por la ecuación (2.14),

$$E = h\nu = \hbar\omega \quad (2.14)$$

donde h es la constante de Planck y $\hbar = h/2\pi$.

2.1.2. Índice de refracción.

El fenómeno de la refracción de la luz ocurre cuando cambia la dirección de propagación de la luz al atravesar de manera oblicua la superficie de separación de dos medios transparentes de distinta naturaleza. La refracción de la luz es determinada por el índice de refracción n y está definida por la ecuación (2.15),

$$n \equiv c/s \quad (2.15)$$

donde s representa la velocidad de la luz en un medio y c es la velocidad de la luz en el vacío [7]. Por tanto, la propagación de las ondas de luz se hace más lenta en un medio con un índice de refracción más alto. Un medio transparente se asocia a un medio donde no ocurre absorción de la luz.

Cuando no existe absorción de luz en los medios, el número de propagación K puede ser obtenido por la ecuación (2.16),

$$K = \frac{\omega n}{c} = \frac{2\pi n}{\lambda} \quad (2.16)$$

donde λ es la longitud de onda de la luz en el vacío. Introduciendo la ecuación (2.16) en la ecuación (2.12) que describe la onda electromagnética, se tiene la ecuación (2.17),

$$E = E_0 \exp[i(\omega t - Kx + \delta)] = E_{t0} \exp\left[i\left(\omega t - \frac{2\pi n}{\lambda} x + \delta\right)\right] \quad (2.17)$$

Donde la amplitud E_{t0} corresponde a E_0 en un medio transparente. Esta ecuación representa una onda electromagnética que viaja en un medio transparente.

Cuando se tiene un medio que presenta absorción de la luz, este fenómeno no puede ser expresado sólo con el índice de refracción. Entonces, para describir la absorción de luz en un medio, se introduce el coeficiente de extinción k . En la ecuación (2.18) se define el índice de refracción complejo N [6].

$$N \equiv n - ik \quad (2.18)$$

Al sustituir el valor de N de la ecuación (2.18) en la ecuación (2.17), se obtiene la ecuación (2.19) que representa una onda electromagnética que viaja en un medio que absorbe luz.

$$\begin{aligned} E &= E_{t0} \exp\left[i\left(\omega t - \frac{2\pi N}{\lambda} x + \delta\right)\right] \\ E &= E_{t0} \exp\left\{i\left[\omega t - \frac{2\pi(n - ik)}{\lambda} x + \delta\right]\right\} \\ E &= E_{t0} \exp\left[-\frac{2\pi k}{\lambda} x\right] \exp\left[i\left(\omega t - \frac{2\pi n}{\lambda} x + \delta\right)\right] \end{aligned} \quad (2.19)$$

Observe que el coeficiente asociado a la exponencial negativa en la ecuación anterior se asocia a un término de atenuación (absorción) en la amplitud de la onda que se propaga en la dirección x , respecto a un sistema de referencia cartesiano ortogonal. En mediciones ópticas, la intensidad de las ondas electromagnéticas está dada por la ecuación (2.20), en donde ϵ_0 es la permitividad eléctrica del medio en el vacío y c corresponde a la velocidad de la luz,

$$I = \frac{1}{2} \epsilon_0 c |E|^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E E^* \quad (2.20)$$

De manera natural, nuestra vista registra la intensidad y no los cambios electromagnéticos asociados a la luz visible. La intensidad de la luz en un medio absorbente se caracteriza por la aplicación de una relación empírica, referida como la ley de Beer, expresada en la ecuación (2.21) [5]:

$$I = I_0 \exp(-\alpha d) \quad (2.21)$$

El coeficiente de absorción de un medio está dado por α , definido en la ecuación (2.22), representando d la distancia en que ocurre la propagación, que depende del coeficiente de extinción y de la longitud de onda:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2.22)$$

2.1.3. Dieléctricos.

Se sabe que la propagación de la luz en un medio puede ser descrito por el índice de refracción complejo. Sin embargo, el índice de refracción complejo en sí se determina a partir de la polarización dieléctrica que se genera en un medio. La polarización dieléctrica es el fenómeno en donde los campos eléctricos externos separan, espacialmente, los cambios eléctricos en un medio. En general, los medios que presenta una polarización dieléctrica grande se denominan dieléctricos. Por tanto, los metales muestran polarización dieléctrica bastante débil porque los campos eléctricos aplicados a los metales hacen que fluya la corriente.

2.1.3.1. Polarización dieléctrica.

Cuando se aplica un campo eléctrico a un medio, las cargas positivas o negativas del medio reciben fuerzas eléctricas en la dirección opuesta. En dieléctricos, sin embargo, las cargas eléctricas no pueden moverse libremente desde los átomos, por ejemplo, ya que se encuentran unidos por enlaces químicos fuertes. No obstante, en presencia de un campo eléctrico, la distribución espacial de las cargas negativas y positivas es modificada ligeramente y se separan en regiones que son más eléctricamente positivos y negativos. Este fenómeno se conoce como polarización dieléctrica.

2.1.3.2. Constante dieléctrica.

La magnitud de la polarización generada dentro de un dieléctrico es expresada por la permitividad o la constante dieléctrica, representada por ϵ .

Como se sabe, la velocidad de propagación de la luz disminuye en un medio que tiene un alto índice de refracción. Este efecto se entiende, si se considera el fenómeno de que la radiación luminosa secuencial de un dipolo eléctrico reduce la velocidad de propagación de la luz. Esto implica que la velocidad de propagación es más baja en dieléctricos con valores altos de ϵ donde los dipolos eléctricos se crean fácilmente en estos dieléctricos. Por lo tanto, existe una relación entre la constante dieléctrica y el

índice de refracción. De las ecuaciones de Maxwell para conductores, el índice de refracción complejo $N \equiv n - ik$ está definido en la ecuación (2.23).

$$N^2 \equiv \varepsilon \quad (2.23)$$

En la ecuación anterior, ε es un número complejo y la constante dieléctrica compleja está definida por la ecuación (2.24).

$$\varepsilon \equiv \varepsilon_1 - i\varepsilon_2 \quad (2.24)$$

Cuando se utiliza la definición de $N \equiv n + ik$, la constante dieléctrica está definida por $\varepsilon \equiv \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$, entonces se tiene las ecuaciones (2.25) y (2.26).

$$\varepsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (2.25)$$

$$\varepsilon_2 = 2nk \quad (2.26)$$

En las ecuación anteriores se puede ver que cuando no existe absorción de la luz ($k = 0$), ε_1 y ε_2 toman el valor de n^2 y 0, respectivamente. En las ecuaciones (2.27) y (2.28) se tiene el índice de refracción complejo, usando la constante dieléctrica compleja de la ecuación (2.24), [8].

$$n = \{[\varepsilon_1 + (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)^{1/2}]/2\}^{1/2} \quad (2.27)$$

$$k = \{[-\varepsilon_1 + (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)^{1/2}]/2\}^{1/2} \quad (2.28)$$

2.2. Polarización de la luz.

El fenómeno de polarización de la luz era conocido desde los trabajos de Christian Huygens (1629-1695) pero fue analizado a fondo por Jean Baptiste Biot (1774-1862) a principios del siglo XIX. Tras estudiar el fenómeno sobre un cristal de cuarzo, Biot encontró la existencia de sustancias que giraban el plano de polarización de la luz hacia la derecha (dextrógiras) y otras que lo hacían hacia la izquierda (levógiras). Por tanto, existen evidencias experimentales que han convencido a la física clásica de que la luz puede tratarse como una onda electromagnética transversal. Una de ellas es la polarización de la luz, bajo determinadas condiciones.

Hay varios tipos de polarización, la más general es la polarización elíptica; también tenemos la polarización circular (los dos campos están desfasados, para el caso de la

elíptica el módulo de la amplitud no es constante y en la circular sí) y lineal (los dos campos se encuentran en fase, módulo y dirección constante).

2.2.1. Representación de los estados de polarización de la luz.

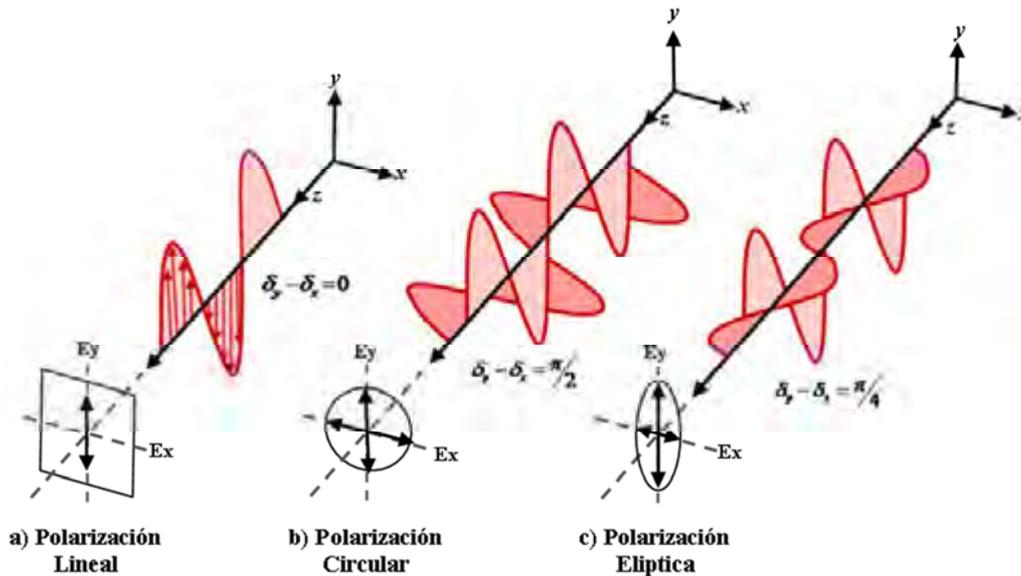


Fig. 2.3 Estados de polarización de la luz.

En la figura 2.3, se muestra la variación del estado de polarización con la diferencia de fase δ_y y δ_x existentes entre los campos eléctricos que oscilan en los planos $x-y$ y $x-z$, respectivamente. En la figura 2.3a ocurre que cuando $\delta_y - \delta_x = 0$, no hay diferencia de fase entre \mathbf{E}_x y \mathbf{E}_y y si estas amplitudes poseen un mismo valor, entonces la orientación del vector resultante ($\mathbf{E}_x + \mathbf{E}_y$) está siempre a 45° en el plano x, y . En otras palabras, una onda electromagnética orientada a 45° puede ser resuelta en dos ondas electromagnéticas de la misma amplitud que vibran paralelas a los ejes x y y , respectivamente. El estado de polarización en la figura 3a muestra una polarización lineal. Cuando la diferencia de fase entre \mathbf{E}_x y \mathbf{E}_y es 90° ($\delta_y - \delta_x = \pi/2$), el vector resultante gira en el plano $x - y$ a medida que se propaga la luz (observando hacia la fuente). Este estado de polarización se muestra en la figura 2.3b conocido como polarización circular (ambas componentes tienen la misma amplitud). Si se elige un plano x, y en un punto fijo en el eje z , el vector resultante que se genera en el plano gira hacia la derecha (en sentido horario) conforme la luz se propaga con el tiempo (la rotación es antihorario en la dirección del eje z). Esta particular polarización es llamada polarización circular derecha.

La polarización en la figura 2.3c muestra la polarización elíptica y gira hacia la derecha (en sentido horario) cuando $\delta_y - \delta_x = \frac{\pi}{4}$ y sus componentes poseen distintas amplitudes.

2.2.2. Vectores de Stokes.

El vector de Stokes, consiste en un arreglo de cuatro cantidades con valores reales (parámetros de Stokes) que describen la intensidad y el estado de polarización de un haz de luz [9]. La luz puede ser completamente polarizada, parcialmente o no polarizada. Puede ser monocromática o policromática. Los cuatro parámetros tienen unidades de irradiancia promedio y se escriben en forma invariante en un vector. Sean los parámetros S_0, S_1, S_2, S_3 , el vector de Stokes estará entonces dado como se muestra en la ecuación (2.29),

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Es conveniente normalizar los parámetros de Stokes dividiendo cada término por el valor de S_0 . Esto tiene el efecto de utilizar un haz de luz incidente de irradiancia unitaria, por ejemplo para luz natural o no polarizada la representación será $[1; 0; 0; 0]^T$, donde T expresa la operación matricial transpuesta. Existen también haces de luz parcialmente polarizados, entonces es útil hablar del concepto de grado de polarización (D_oP) el cual se calcula a partir de los valores determinados para el vector de Stokes.

2.2.3. Polarización elíptica.

En un haz de luz, el estado de polarización más general es la polarización elíptica, la cual se representa por la llamada elipse de polarización [10]. Esta elipse está caracterizada por tres parámetros independientes, las dos amplitudes A_x, A_y de las componentes del campo eléctrico y su diferencia de fase δ , o bien por las longitudes de sus semiejes mayor y menor (a y b respectivamente) y por el ángulo φ (acimut), que es el ángulo formado por el eje mayor de la elipse con el eje OX de referencia.

La caracterización completa de la elipse de polarización cuando describe la elipse, requiere conocer el sentido del giro del vector campo eléctrico E . La polarización elíptica es dextrógira si su diferencia de fase toma valores comprendidos en el intervalo de

$0^\circ < \delta < 180^\circ$, análogamente se dice que la polarización elíptica es levógira si $180^\circ < \delta < 360^\circ$.

Introduciendo el ángulo χ (elipticidad), como $\tan \chi = \pm b/a$ y donde el signo indica el sentido de giro del vector campo eléctrico, se puede demostrar que si $0^\circ < \delta < 180^\circ$ entonces $0^\circ < \chi < 45^\circ$, y que si $180^\circ < \delta < 360^\circ$ entonces $-45^\circ \leq \chi < 0^\circ$.

La intensidad de la luz está dada por la ecuación (2.30),

$$I = a^2 + b^2 = A_x^2 + A_y^2 \quad (2.30)$$

2.2.4. Representación de la polarización mediante la esfera de Poincaré.

La esfera de Poincaré constituye un modelo adecuado para la representación de estados de polarización de la luz, así como de la acción de los medios materiales sobre la luz polarizada [9]. Cada posible estado de polarización está representado por un punto en la esfera, con unas coordenadas dadas por 2φ y 2χ . Recíprocamente, cada punto de la esfera de longitud 2φ y latitud 2χ representa un estado de polarización, cuya elipse tiene un acimut φ y una elipticidad χ (ver figura 2.4.).

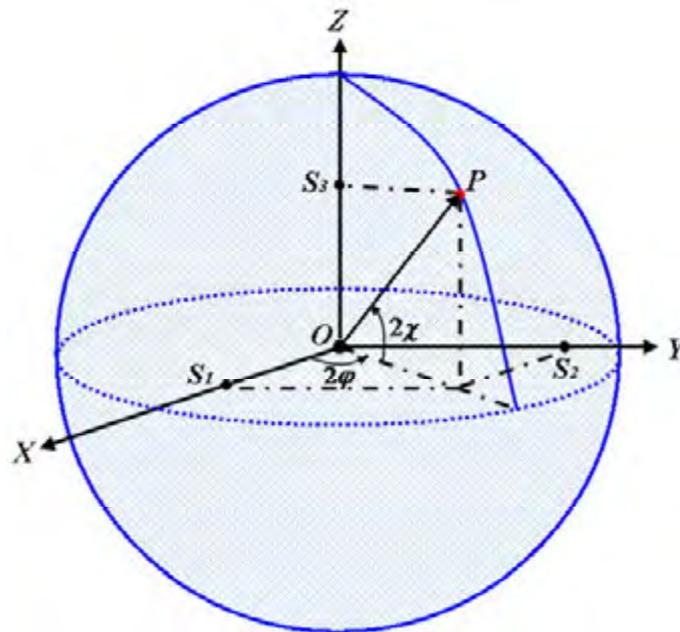


Fig. 2.4 Esfera de Poincaré.

De acuerdo con lo anterior, los distintos estados de polarización quedan representados del siguiente modo [11]:

- Valores positivos de χ , representan estados de polarización elíptica dextrógira. En la esfera de Poincaré se representan por puntos en el hemisferio superior entonces $0^\circ < 2\chi \leq 90^\circ$.
- Valores negativos de χ , representan estados de polarización elíptica levógira. En la esfera de Poincaré se representa por puntos en el hemisferio inferior, entonces $90^\circ \leq 2\chi \leq 0^\circ$.
- Puntos del ecuador $0^\circ \leq 2\varphi < 360^\circ$ y $\chi = 0^\circ$, representan estados de polarización lineal. En particular, los puntos que están sobre la parte positiva del eje OX, representan estados de polarización horizontal $\varphi = 0^\circ$, mientras que los puntos que están sobre la parte negativa del eje OX, representan estados de polarización vertical $\varphi = 90^\circ$.
- El polo norte de la esfera, representa un estado de polarización circular dextrógira, mientras que el polo sur, representa un estado de polarización circular levógira. En los dos casos $\chi = 45^\circ$.
- Puntos del hemisferio norte, representan estados de polarización elíptica dextrógira. Mientras que los puntos del hemisferio sur, representan estados de polarización elíptica levógira. Además, la mitad del valor de la longitud 2φ y de la latitud 2χ de cada punto de la esfera, define el acimut φ y la elipticidad χ de la correspondiente elipse de polarización.
- Puntos en el mismo meridiano $\varphi = constante$, representan estados de polarización tales que sus elipses de polarización tienen la misma orientación. Mientras que puntos en el mismo paralelo $\chi = constante$, representa estados de polarización tales que sus elipses de polarización tienen la misma elipticidad.
- Puntos de la superficie de la esfera, representan luz totalmente polarizada.
- Puntos interiores de la esfera, representan luz parcialmente polarizada. En este caso la distancia del punto a centro es:

$$R = \frac{\text{Intensidad parte totalmente polarizada}}{\text{Intensidad total}} = G \text{ (Grado de polarización)}$$

- En el centro de la esfera, representa luz no polarizada, la cual puede interpretarse como una mezcla incoherente de todos los estados de polarización posibles ($r=0=G$).

Los puntos fuera de la esfera, no tienen sentido físico. Usualmente están asociados a errores de cálculo o de medición experimental.

Cada punto de la esfera de Poincaré viene dado por r y dos coordenadas angulares esféricas 2φ y 2χ . Por tanto las coordenadas cartesianas X, Y, Z de un punto cualquiera de la esfera de Poincaré se representan en la ecuación (2.31),

$$\begin{aligned} X &= r \cos 2\chi \cos 2\varphi \\ Y &= r \cos 2\chi \sen 2\varphi \\ Z &= r \sen 2\chi \end{aligned} \quad (2.31)$$

Las componentes de los vectores de Stokes, pueden expresarse en función del acimut φ y la elipticidad χ , como se ve en la ecuación (2.32):

$$\begin{aligned} S_1 &= S_0 G \cos 2\chi \cos 2\varphi \\ S_2 &= S_0 G \cos 2\chi \sen 2\varphi \\ S_3 &= S_0 G \sen 2\chi \end{aligned} \quad (2.32)$$

Estos valores nos permiten representar un vector de Stokes, por un punto de la esfera de Poincaré cuyas coordenadas X, Y, Z son respectivamente $S_1/S_0, S_2/S_0, S_3/S_0$. Se normalizan los parámetros de Stokes respecto a la intensidad total, por lo que la esfera de Poincaré siempre tiene un radio unitario.

Es conocido el hecho de que los efectos que produce un medio material sobre la polarización de la luz que interacciona con él, equivale a los que producirá una determinada combinación de polarizadores y retardadores.

Los polarizadores se caracterizan por producir una absorción o reflexión selectiva de la luz que incide sobre ellos, mientras que los retardadores le producen un determinado retardo óptico.

2.2.5. Matriz de Mueller.

La respuesta lineal de un medio a la irradiancia (intensidad) asociada a un haz de luz incidente, se representa por un arreglo matricial cuadrado, constituido por 16 elementos reales, al que se le denomina matriz de Mueller [12]. Las matrices de Mueller pueden describir sistemas que no despolarizan o bien que despolarizan, parcial o totalmente. Esta respuesta lineal de un sistema óptico a un haz de luz incidente se puede expresar mediante la relación dada por la ecuación (2.33),

$$S^o = MS^i = \begin{pmatrix} S_0^o \\ S_1^o \\ S_2^o \\ S_3^o \end{pmatrix}$$

$$S_o = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_0^i \\ S_1^i \\ S_2^i \\ S_3^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{00}S_0^i + m_{01}S_1^i + m_{02}S_2^i + m_{03}S_3^i \\ m_{10}S_0^i + m_{11}S_1^i + m_{12}S_2^i + m_{13}S_3^i \\ m_{20}S_0^i + m_{21}S_1^i + m_{22}S_2^i + m_{23}S_3^i \\ m_{30}S_0^i + m_{31}S_1^i + m_{32}S_2^i + m_{33}S_3^i \end{pmatrix} \quad (2.33)$$

donde M se conoce como matriz de Mueller del sistema representada como una matriz cuadrada 4×4 de elementos reales y S es la representación del estado de polarización de la luz mediante una matriz de Stokes (comúnmente denominado vector de Stokes).

2.2.6. Métricas de polarización.

Para toda matriz de Mueller puede asociarse un *índice de despolarización*, que se define como un número que representa el porcentaje de despolarización ejercido por el sistema para cualquier haz de luz incidente ($0 \leq DI(M) \leq 1$). La interpretación física asociada a los límites del grado de polarización (índice de despolarización) es la siguiente: 0 corresponde a luz despolarizada (sistema totalmente despolarizante), 1 a luz totalmente polarizada (sistema no despolarizante) y los valores intermedios a luz parcialmente polarizada o despolarizada (sistema parcialmente despolarizante), respectivamente [13].

El índice de despolarización $DI(M)$ y sus límites físicamente permitidos, se definen por la ecuación (2.34),

$$0 \leq DI(M) \leq \frac{\{\sum_{j,k=0}^3 m_{jk}^2 - m_{00}^2\}^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{3}m_{00}} \leq 1 \quad (2.34)$$

$DI(M)$ está relacionada directamente con los elementos de la matriz de Mueller. Este índice es la respuesta despolarizante promedio ante cualquier haz de luz incidente, independientemente de su estado de polarización particular.

Se entiende por despolarización a la pérdida en el grado de polarización que experimenta un haz de luz después de haber interactuado con algún medio material, en reflexión, transmisión, absorción, esparcimiento o en cualquier combinación entre estos mecanismos que un sistema puede presentar.

Por otro lado, el grado de polarización $DoP(M, S)$ y sus límites físicamente permitidos han sido definidos por la ecuación (2.35). El grado de polarización es una medida del porcentaje de luz polarizada asociado a un haz de luz ($0 \leq DoP \leq 1$), usualmente se mide directamente del haz de luz bajo consideración, aun cuando pudiera medirse indirectamente utilizando la propia respuesta lineal de algún medio (matriz de Mueller), para estados de polarización incidentes conocidos.

$$0 \leq DoP(M, S) \leq \frac{\sqrt{(S_1^o)^2 + (S_2^o)^2 + (S_3^o)^2}}{S_0^o} = \frac{[\sum_{j=1}^3 (m_{j0}S_0^i + m_{j1}S_1^i + m_{j2}S_2^i + m_{j3}S_3^i)^2]^{1/2}}{m_{00}S_0^i + m_{01}S_1^i + m_{02}S_2^i + m_{03}S_3^i} \leq 1 \quad (2.35)$$

Se tiene otras métricas escalares auxiliares como los parámetros de polarizancia y diatenuancia, que miden la respuesta polarizante o absorbente de un sistema físico, determinado por su matriz de Mueller.

Los parámetros de diatenuación, $D(M)$, y de polarizancia, $P(M)$, se definen por las ecuaciones (2.36) y (2.37), respectivamente.

$$0 \leq D(M) = \sqrt{m_{01}^2 + m_{02}^2 + m_{03}^2} / m_{00} \leq 1 \quad (2.36)$$

$$0 \leq P(M) = \sqrt{m_{10}^2 + m_{20}^2 + m_{30}^2} / m_{00} \leq 1 \quad (2.37)$$

También existe una nueva métrica escalar para la despolarización de la luz, denominada $Q(M)$, cuyos límites ($0 \leq Q(M) \leq 3$) permiten identificar una matriz de Mueller asociada a un sistema físico totalmente despolarizante, parcialmente despolarizante, no despolarizante diatenuante y no despolarizada no diatenuante, respectivamente.

La métrica escalar $Q(M)$ para la despolarización de luz, su relación funcional con el índice de despolarización, los parámetros de diatenuación y polarizancia, así como sus límites físicos han sido definidos por la ecuación (2.38) [14-15],

$$0 \leq Q(M) \leq \frac{\sum_{j=1, k=0}^3 m_{jk}^2}{\sum_{k=0}^3 m_{0k}^2} = \frac{3[DI(M)]^2 - [D(M)]^2}{1 + [D(M)]^2} = \frac{\frac{\{\sum_{j,k=1}^3 m_{jk}^2\}}{m_{00}^2} + [P(M)]^2}{1 + [D(M)]^2}} \leq 3 \quad (2.38)$$

donde $Q(M) = 0$ ocurre para un sistema óptico totalmente despolarizante; $0 < Q(M) < 1$ para un sistema óptico parcialmente despolarizante; si $1 < Q(M) < 3$ y $0 < Q(M) < 1$ el sistema despolariza la luz parcialmente también, pero si $DI(M) = 1$, el sistema es no despolarizante diatenuante; finalmente, si adquiere el valor superior, $Q(M) = 3$ describe un sistema óptico no despolarizante y no diatenuante, respectivamente. Cuando el valor

de $Q(M)$ se localiza dentro del tercer intervalo de valores permitidos es necesario calcular, además, el valor de $DI(M)$ y esto solo en una ocasión; para el resto de los intervalos, $Q(M)$ es autoconsistente.

Además de las propiedades matemáticas para las matrices de Mueller, existen condiciones que deben cumplir como sistemas físicamente consistentes. El verificar que una matriz de Mueller las cumpla, es de vital importancia, pues ello significa conocer si la misma fue determinada correctamente o no. Decir que una matriz de Mueller no es físicamente consistente, puede significar que no fue correctamente medida debido a errores de calibración del instrumento o a ruido electrónico u óptico presente en las mediciones, que no fue correctamente calculada debido a consideraciones inapropiadas en el modelo utilizado, entre otras muchas más causales experimentales, teóricas o numéricas.

Una característica muy importante de todo sistema óptico, es su capacidad para despolarizar la luz incidente. Las métricas de despolarización escalares tienen por objetivo proporcionar un número capaz de aportar la máxima información posible acerca del sistema óptico bajo consideración.

2.3. Elipsometría Espectroscópica.

La elipsometría es una técnica de medición óptica que mide el cambio del estado de polarización de la luz que es reflejada o transmitida por la muestra [8, 16]. El nombre de elipsometría se debe a que la luz polarizada del haz reflejado o transmitido está polarizada elípticamente. La elipsometría mide dos parámetros (ψ, Δ) . El primero representa la relación de amplitud, ψ , y la segunda la diferencia de fase Δ entre las ondas de luz que están polarizadas en P y S (figura 2.5).

En elipsometría espectroscópica, el espectro (ψ, Δ) se obtiene en función de la longitud de onda. En general, la medición se realiza en la región del ultravioleta/visible, aunque también en la región del infrarrojo ha sido medida. Esta técnica es útil para modelar la respuesta óptica del material, así también para obtener funciones ópticas como el índice de refracción, coeficiente de extinción y absorción, el espesor de una muestra, la función dieléctrica, entre otras.

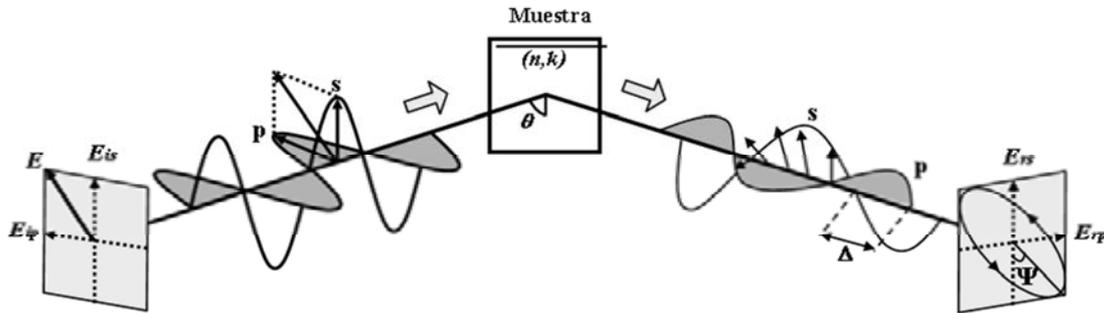


Fig. 2.5 Principio de medición en elipsometría.

2.3.1. Parámetros elipsométricos.

En elipsometría, las ondas ortogonales de luz polarizada p (paralela al plano de incidencia) y s (perpendicular al plano de incidencia) son irradiadas a una muestra en un ángulo de incidencia cercano al ángulo de Brewster. Las constantes ópticas y el espesor de la película son medidos a partir del cambio en el estado de polarización por la reflexión o transmisión de la luz.

La elipsometría mide dos parámetros elipsométricos (ψ, Δ) , que expresan la relación de la amplitud y la diferencia de fase entre la polarización p y s , respectivamente. Por tanto, en la elipsometría la variación de la reflexión de la luz con polarización p y s es medida como un cambio en el estado de polarización. En particular, cuando la estructura de una muestra es simple, la relación de amplitud está caracterizada por el índice de refracción n , mientras que la absorción de la luz está descrita por el coeficiente de extinción k . En este caso, los dos parámetros pueden ser determinados a partir de los dos parámetros elipsométricos mediante la aplicación de las ecuaciones de Fresnel.

Los parámetros (ψ, Δ) se definen a partir de la relación de amplitud de los coeficientes de reflexión y transmisión de la polarización p y s , como se muestra en las ecuaciones (2.39) y (2.40), respectivamente.

$$\rho = \tan \psi \exp(i\Delta) \equiv \frac{r_p}{r_s} \quad (2.39)$$

$$\tau = \tan \psi \exp(i\Delta) \equiv \frac{t_p}{t_s} \quad (2.40)$$

Tomando en cuenta las definiciones de la amplitud de los coeficientes de reflexión de Fresnel r_p y r_s , se obtiene la ecuación (2.41).

$$\rho = \tan \psi \exp(i\Delta) \equiv \frac{r_p}{r_s} \equiv \left(\frac{E_{rp}}{E_{ip}} \right) / \left(\frac{E_{rs}}{E_{is}} \right) \quad (2.41)$$

2.3.2. Efecto de despolarización de las muestras.

Cuando las muestras presentan efectos de despolarización, la luz totalmente polarizada (utilizada como fuente) se transforma en luz parcialmente polarizada o incluso en luz totalmente despolarizada. En este caso, el error de medición del espectroelipsómetro se hace muy grande, ya que dicho instrumento asume que la luz reflejada se encuentra totalmente polarizada. También las estructuras de las muestras pueden cambiar la precisión y el porcentaje en las mediciones de elipsometría.

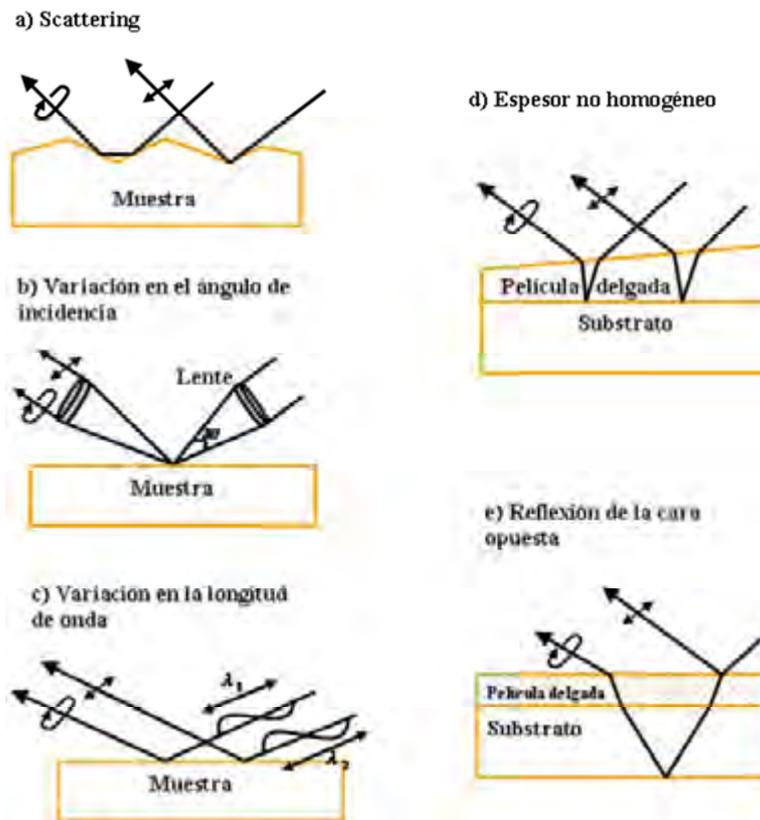


Fig. 2.6 Factores que generan la despolarización de la luz.

A continuación se mencionan algunos de los fenómenos físicos que hacen que la luz reflejada sea luz parcialmente polarizada (ver figura 2.6):

- a) Una superficie que genere scattering (dispersión) de la luz, por ejemplo, una muestra que tenga una superficie rugosa.
- b) La variación del ángulo de incidencia originado por la colimación de la luz de prueba.
- c) La variación de la longitud de onda causada por el ancho de banda finito del monocromador.
- d) Falta de homogeneidad en la película delgada formada en un sustrato.
- e) La reflexión de la cara opuesta que se produce cuando la absorción de la luz de un sustrato es bastante débil.

2.3.3. Análisis de datos.

2.3.3.1. Aproximación del medio efectivo.

Cuando se estudia con elipsometría espectroscópica hay que tener en cuenta que este método es muy sensible a la estructura de la superficie y su interfaz. Por lo tanto, es necesario incorporar estas estructuras en el análisis de datos dentro de un modelo óptico. Para calcular con facilidad el índice de refracción compleja de la rugosidad de una superficie y las capas de la interfaz se puede aplicar la Aproximación Media Efectiva (EMA) [8].

Esta aproximación permite reemplazar el medio heterogéneo por uno homogéneo equivalente o medio efectivo. El medio efectivo posee las mismas propiedades de transporte que el medio original y por lo tanto exhibe la misma respuesta macroscópica a las perturbaciones externas.

2.4. Ángulo crítico y ángulo de Brewster.

Cuando un rayo de luz incide en la superficie de separación entre dos medios distintos, parte de la luz se refleja y otra se refracta (penetra en el interior del segundo medio), propagándose este último con un ángulo y una velocidad diferente al del primer medio, como se muestra en la figura 2.7.

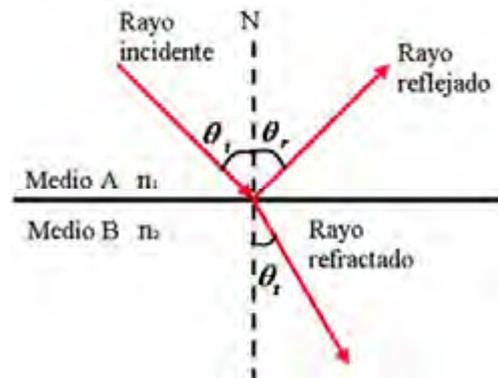


Fig. 2.7 Haz de luz reflejado y refractado (transmitido) en la frontera entre dos índices de refracción n_1 y n_2 .

Estas dos magnitudes se pueden caracterizar mediante el índice de refracción, que es un valor característico para cada sustancia. En el primer medio, el ángulo de incidencia θ_i y el de reflexión θ_r , formados en la normal de la separación de los medios, tienen el mismo valor, $\theta_i = \theta_r$ si la frontera que separa ambos medios es plana y no posee rugosidades. El ángulo de refracción θ_t presente en el segundo medio está dado por la Ley de Snell mediante la ecuación (2.42) [5],

$$n_1 \text{ sen } \theta_i = n_2 \text{ sen } \theta_t \quad (2.42)$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción asociados a los medios incidente y transmitidos, respectivamente.

Si $n_1 > n_2$ para ciertos ángulos de incidencia se presenta el fenómeno llamado reflexión total interna. Este efecto se manifiesta cuando un rayo de luz se refleja de tal modo que no es capaz de atravesar la superficie entre ambos medios reflejándose completamente (figura 2.8). Este fenómeno solo se produce para ángulos de incidencia iguales o superiores a un cierto valor de incidencia llamado ángulo crítico θ_c descrito en la ecuación (2.43).

$$\theta_c = \text{arcsen} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2.43)$$

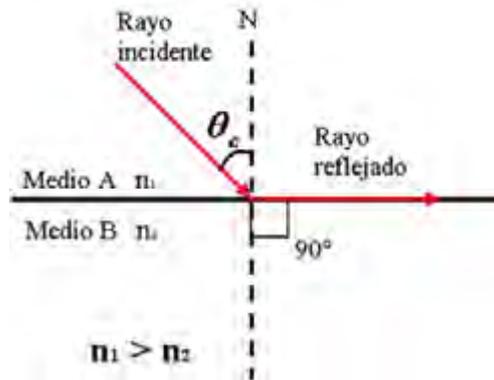


Fig. 2.8 Ángulo crítico.

El ángulo de Brewster θ_B corresponde al ángulo de incidencia de la luz sobre una superficie, que anula la componente con polarización paralela al plano de incidencia y está dado por la ecuación (2.44),

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.44)$$

Al incidir un haz de luz al ángulo de Brewster, la componente de la polarización paralela al plano de incidencia se anula en el haz reflejado. Por este motivo, el haz que se ve reflejado posee una polarización lineal, justamente en la dirección perpendicular al plano de incidencia, independientemente del tipo de polarización propia del haz incidente. Se debe notar que en el caso particular de incidir con un haz linealmente polarizado en la dirección paralela al plano de incidencia, el haz reflejado se anula completamente en el ángulo de Brewster. En este caso, se produce una transmisión total del haz entre ambos medios (figura 2.9). Al medir el ángulo de Brewster, normalmente en el aire $n_1 = 1$, es posible calcular n_2 .

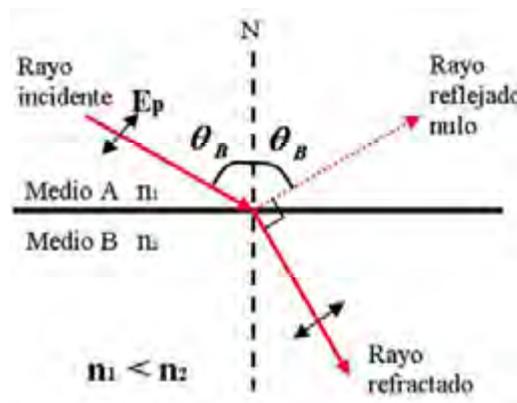


Fig. 2.9 Luz polarizada paralela incidente al ángulo de Brewster (no hay rayo reflejado).

2.4.1. Refractómetro de Abbe

Cuando un haz luminoso pasa de un medio ópticamente más denso a otro ópticamente menos denso, el ángulo de incidencia es menor que el ángulo de refracción y, si cambiamos el primero hasta que el segundo llegue a ser de 90° , se obtiene el ángulo crítico. El principio de este refractómetro para determinar el índice de refracción se basa en la incidencia de la luz sobre la muestra bajo estudio al ángulo crítico.

Cuando el haz luminoso incide sobre la superficie desde cualquier ángulo de incidencia θ_i , su ángulo de refracción θ_t es siempre mayor que θ_i . Si observamos el haz emergente a través de un telescopio, aparece el campo visual dividido en dos mitades, una oscura y otra clara. Si situamos la línea que delimita las dos mitades, justo en el centro encontramos la posición del ángulo crítico.

En el refractómetro de Abbe, la muestra se coloca entre un prisma incidente y un prisma de refracción (figura 2.10). El medio B es un prisma cuyo índice de refracción es n_2 . Sobre la superficie se coloca la muestra a medir (líquido o sólido transparente) cuyo índice de refracción es n_1 .

El prisma de refracción está hecho de un vidrio con alto índice de refracción. El refractómetro está diseñado para hacer mediciones con muestras que tengan un índice de refracción menor que el del prisma de refracción. Una fuente de luz se proyecta a través del prisma incidente, la superficie inferior (superficie rugosa, esmerilada) genera rayos de luz que viajan en todas direcciones. En la figura 2.10 se muestra que la luz que viaja del punto A-B tendrá mayor ángulo de incidencia y por lo tanto, el mayor ángulo posible de la refracción para esa muestra. Los demás rayos de luz que inciden en el prisma de refracción tendrán un ángulo de refracción y por tanto, se direccionan en la parte izquierda del punto C. Por tanto, en la parte inferior del prisma refractante se observa una región de luz a la izquierda y una región oscura a la derecha. La longitud de onda de la luz utilizada en el refractómetro es la línea D del sodio, a 589 nm.

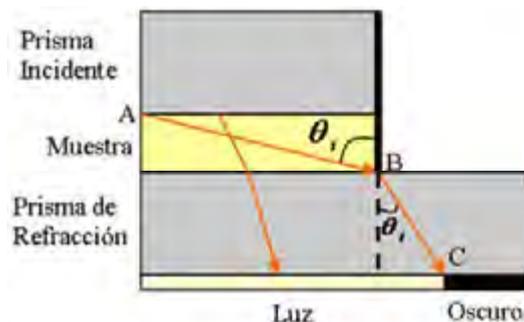


Fig. 2.10 Sección transversal de una parte del camino óptico de un refractómetro de Abbe.

2.4.2. Esparcimiento resuelto angularmente.

El ángulo de reflexión θ_B se mide cuando un haz de luz no polarizada incidente se polariza al ser reflejado desde la superficie de la muestra. Entonces, con la ecuación de la Ley de Snell se puede obtener el valor del índice de refracción de la muestra n_2 , ya que n_1 es el índice de refracción del medio que contiene tanto la luz incidente como la reflejada, que generalmente es aire, $n_1 = 1$. Si la superficie de la muestra es plana, la polarización paralela al plano de incidencia en el haz reflejado es cero, entonces el ángulo de reflexión es el ángulo de Brewster θ_B . Si se ilumina con luz no polarizada, el ángulo de Brewster se logra cuando la luz reflejada alcanza su mínimo valor.

2.5. Espectroscopia Raman.

2.5.1. Fundamentos de espectroscopia Raman.

El efecto Raman fue predicho teóricamente por A. Smekal en 1923. Pero fue demostrado experimentalmente por primera vez por Sir Chandrasekhra Venkata Raman en 1928, utilizando únicamente instrumentos simples y rústicos disponibles en su laboratorio. Para el estudio de muestras líquidas, Sir Raman usó la luz del Sol como fuente de luz, un telescopio como el colector y sus ojos como detector [17,18].

La espectroscopia Raman está encontrando aplicaciones a través de un amplio rango de áreas de investigación, como en la bioquímica, biología, medicina, estado sólido, química estructural, aplicaciones industriales, entre otras. Además, tiene la gran ventaja

de ser una técnica no destructiva que proporciona información sobre la composición mineral-química de la muestra a analizar.

La espectroscopia Raman es una técnica analítica que proporciona información química y estructural de casi cualquier material o compuesto orgánico y/o inorgánico permitiendo así su identificación.

El efecto Raman se presenta cuando un haz de luz monocromática de frecuencia ν_0 incide sobre un conjunto de moléculas, la mayoría de los fotones son esparcidos elásticamente. Por lo tanto, los fotones esparcidos tienen la misma energía (frecuencia ν_0) y longitud de onda como los fotones incidentes. Sin embargo, una cantidad pequeña de luz (aproximadamente 1 en 10^7 fotones) es esparcida a frecuencias ópticas diferentes, usualmente más bajas que la frecuencia de los fotones incidentes.

El efecto de dispersión Raman surge a partir de la interacción de la luz incidente con los electrones de una molécula iluminada. En la dispersión Raman, la energía de la luz incidente no es suficiente para excitar la molécula a un nivel electrónico de mayor energía. Así el resultado de la dispersión Raman es cambiar el estado vibracional de la molécula.

A cada uno de los movimientos vibracionales y rotacionales de la molécula le corresponderá un valor determinado de la energía molecular. En la figura 2.11 se muestra un diagrama energético en el que cada estado de energía se representa por una línea horizontal.

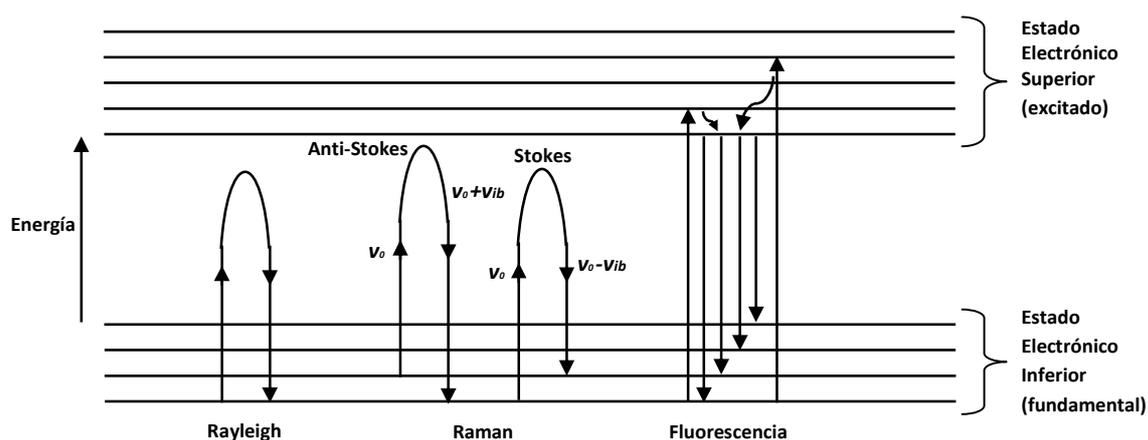


Fig. 2.11 Diagrama energético en el que las líneas horizontales representan distintos estados vibracionales y en el que se muestran las transiciones entre estados energéticos para diferentes interacciones luz-materia.

Cuando los fotones del haz de luz incidente, con energía $h\nu_0$ (donde h es la constante de Planck) es mucho mayor a la diferencia de energía entre dos niveles vibracionales (o rotacionales) de la molécula, chocan con ella, la mayor parte la atraviesan pero una pequeña fracción de ellos es dispersada. Esta dispersión se debe a que el fotón incidente lleva a la molécula transitoriamente a un nivel de energía vibracional (o rotacional) superior permitido, el cual abandonará rápidamente para pasar a uno de los niveles de energía permitidos emitiendo un fotón; la frecuencia a la cual es liberado este fotón dependerá del salto energético realizado por la molécula.

Si el resultado de la interacción fotón-molécula es un fotón dispersado a la misma frecuencia que el fotón incidente, se dice que el choque es elástico ya que ni el fotón ni la molécula sufren variaciones en su estado energético; la molécula vuelve al mismo nivel de energía que tenía antes del choque y el fotón dispersado tiene la misma frecuencia ν_0 que el incidente, dando lugar a la dispersión Rayleigh y no aporta ninguna información sobre la composición de la muestra a analizar.

Si el resultado de la interacción fotón-molécula es un fotón dispersado a una frecuencia distinta de la incidente, se dice que el choque es inelástico (existe transferencia de energía entre molécula y el fotón); en este caso pueden darse dos fenómenos:

- Si el fotón dispersado tiene una frecuencia menor a la del incidente, se produce una transferencia de energía del fotón a la molécula que, después de saltar al estado de energía no permitido, vuelve a uno permitido mayor al que tenía inicialmente; el fotón es dispersado con frecuencia $\nu_0 - \nu_R$ y se produce la dispersión Raman Stokes.
- Si el fotón dispersado tiene una frecuencia mayor a la de la incidente, se produce una transferencia de energía de la molécula al fotón; esto significa que la molécula, inicialmente antes del choque no se encontraba en su estado vibracional fundamental sino en uno de mayor energía y después del choque pasa a este estado; el fotón es dispersado con frecuencia $\nu_0 + \nu_R$ y se produce la dispersión Raman Anti-Stokes.

Para la interpretación clásica del efecto Raman, se tratará el caso simple de una molécula diatómica. El esparcimiento Raman se produce por los cambios que tienen lugar en la polarizabilidad eléctrica (α) de una molécula durante la vibración. La polarizabilidad es una medida de la facilidad con la cual pueden distorsionarse las nubes de electrones que están alrededor de los átomos en la molécula. Los átomos más pesados tienen nubes

electrónicas más grandes y en consecuencia tienen mayores polarizabilidades individuales.

El campo eléctrico de una onda electromagnética (un haz láser) es una función del tiempo y se puede representar por la ecuación (2.45),

$$E = E_0 \cos(2\pi\nu_0 t) \quad (2.45)$$

en donde E_0 es la amplitud vibracional y ν_0 es la frecuencia de la onda electromagnética. Cuando se ilumina a una molécula diatómica con esta radiación, se induce un momento dipolar [17] representado por la ecuación (2.46),

$$P = \alpha E = \alpha E_0 \cos(2\pi\nu_0 t) \quad (2.46)$$

Si la molécula vibra con una frecuencia ν_m , el desplazamiento nuclear Q se puede escribir mediante la ecuación 2.47,

$$Q = Q_0 \cos(2\pi\nu_m t) \quad (2.47)$$

Por otro lado, en la ecuación (2.48) se presenta la polarizabilidad de una molécula que puede describirse por medio de una expansión de Taylor [17],

$$\alpha = \alpha_0 + \left(\frac{d\alpha}{dQ}\right)_0 Q + \dots, \quad (2.48)$$

donde α_0 es la polarizabilidad en la posición de equilibrio; Q se refiere a la coordenada normal; es decir, éste es el término matemático del conjunto completo de estiramientos de enlaces y flexiones de ángulos que tienen lugar durante una vibración particular y $\left(\frac{d\alpha}{dQ}\right)_0$ es el cambio en la polarización durante la vibración descrita por la coordenada normal. El subíndice cero indica que es evaluado en la posición de equilibrio.

Al sustituir las ecuaciones (2.45) y (2.48) en la ecuación (2.46) se obtiene la ecuación (2.49).

$$P = \alpha_0 E_0 \cos(2\pi\nu_0 t) + \left(\frac{d\alpha}{dQ}\right)_0 Q E_0 \cos(2\pi\nu_0 t) \quad (2.49)$$

Sustituyendo la ecuación (2.47) en la ecuación (2.49), se obtiene la ecuación (2.50).

$$P = \alpha_0 E_0 \cos(2\pi\nu_0 t) + \left(\frac{d\alpha}{dQ}\right)_0 Q_0 E_0 \cos(2\pi\nu_0 t) \cos(2\pi\nu_m t) \quad (2.50)$$

Usando la identidad trigonométrica $\cos(a)\cos(b) = \frac{1}{2}[\cos(a+b)\cos(a-b)]$ se puede expresar el segundo término del momento dipolar eléctrico de la forma de la ecuación (2.51),

$$P = \alpha_0 E_0 \cos(2\pi\nu_0 t) + \frac{1}{2} \left(\frac{d\alpha}{dQ} \right)_0 Q_0 E_0 [\cos 2\pi(\nu_0 + \nu_m)t + \cos 2\pi(\nu_0 - \nu_m)t] \quad (2.51)$$

El primer término representa un dipolo oscilante que emite luz de frecuencia ν_0 (dispersión Rayleigh), el segundo corresponde a la dispersión Raman de frecuencia $\nu_0 + \nu_m$ (anti-Stokes) y $\nu_0 - \nu_m$ (Stokes). Si $\left(\frac{d\alpha}{dQ} \right)_0$ es igual a cero, la vibración Raman no estaría activa. Por tanto, para que se presente esparcimiento Raman se necesita que el cambio en la polarización sea diferente de cero.

2.5.2. Fluorescencia.

En el análisis de muestras de ámbar por medio de espectroscopia Raman, el fenómeno de la fluorescencia genera un gran problema. La naturaleza del material condiciona la obtención de la señal Raman. Si el material genera una gran fluorescencia al ser excitado por la luz láser, la señal Raman será poco visible o completamente opacada y no se podrá obtener un buen espectro Raman en la medición.

La fluorescencia es un fenómeno por el cual algunos materiales y sustancias tienen la capacidad de absorber luz a una determinada longitud de onda, por lo general en el rango ultravioleta, y luego emiten luz en una longitud de onda más larga. Dicho de otra manera, absorben fotones con una determinada energía, y liberan fotones con menor energía. Este proceso es casi inmediato y ocurre en todas las direcciones angulares, la luz es recibida y vuelta a emitir en millonésimas de segundo, por lo tanto podemos decir que la fluorescencia dura tanto como el estímulo, ya que cuando éste cesa, también cesa el fenómeno de fluorescencia. Esta es la principal diferencia con el fenómeno de fosforescencia, en el cual la luz absorbida se vuelve a emitir luego de transcurrido un cierto lapso. La tasa de emisión de la fluorescencia es típicamente del orden de 10^8 s^{-1} , por lo tanto el tiempo de vida de la fluorescencia es del orden de 10 nanosegundos [19].

Una de las formas de reducir los efectos de la fluorescencia es usar láseres que emitan en longitudes de onda largas; esto con el propósito de reducir la probabilidad de inducir transiciones electrónicas. En los espectros Raman obtenidos (sección de resultados), se observó una mayor reducción de la fluorescencia cuando se usa el láser con emisión en 830 nm.

Capítulo 3

Materiales y métodos.

3.1. Preparación de muestras.

Se analizaron 21 muestras de ámbar de Chiapas, las cuales fueron extraídas de minas de la ciudad de Simojovel de Allende, Chiapas. Dichas muestras presentan diferentes tonalidades de color, tamaño y forma, cantidad de inclusiones y calidad de pulido (las fotografías de las muestras se encuentran en el apéndice A).

Las muestras de ámbar se limpiaron con agua destilada y se secaron con aire comprimido con el objetivo de eliminar las partículas de grasa o impurezas, presentes en la superficie de las muestras, que pudieran afectar los resultados de la medición.

3.2. Medición del índice de refracción del ámbar de Chiapas.

Existen varias técnicas y equipos que permiten medir el índice de refracción de un material. Los equipos que se utilizaron para medir el índice de refracción del ámbar de Chiapas fueron el espectroelipsómetro, el refractómetro de Abbe y el esparcimiento resuelto angularmente (ARS) para la determinación del ángulo de Brewster.

3.2.1. Espectroelipsómetro.

Para determinar el índice de refracción en función de la longitud de onda incidente, se utilizó el espectroelipsómetro mostrado en la figura 3.1, en el cual se realizó un barrido de longitud de onda de 250 nm a 1100 nm.

3.2.1.1. Equipo.

El espectroelipsómetro (marca Angstrom Advanced, modelo PHE-102) consta de lo siguiente:

- Fuente de luz: lámpara de Xenón (Hamamatsu L2174-02).

- Monocromador que permite la transmisión de luz en el rango UV, VIS y NIR (250 nm - 1100 nm).
- Generador y analizador de estados de polarización basado en compensador rotante (placa de cuarto de onda acromática). Esto es, forma un polarímetro completo.
- Goniómetro de precisión manual para medición de ángulos variables (de 20° a 90°) con pasos de 5°.
- Platina con un diámetro de 150 mm, se puede ajustar la altura e inclinación de ésta. Las muestras pueden tener un espesor máximo de 30,000 nm.
- Computadora y software PHE (comercial) para la adquisición y análisis de datos.

La fuente de luz blanca tiene asociada una sección transversal circular de 1 mm de diámetro (localizado en el brazo donde se encuentra el generador de estados de polarización). A medida que se cambia el ángulo de incidencia, se forma una elipse sobre la muestra bajo estudio, de tal manera que a 60 grados de incidencia ilumina un área aproximada de 1 mm x 3 mm. Las características superficiales y materiales de la muestra bajo estudio generan un cambio en el estado de polarización de la luz incidente. La luz reflejada por la muestra es detectada por el analizador de estados de polarización, que de manera análoga al generador de estados de polarización, consta de una placa retardadora de cuarto de onda acromática y de un polarizador lineal, tiene además un sensor fotomultiplicador, que registra dichos cambios con los parámetros elipsométricos, Psi (φ) y Delta (Δ).



Fig. 3.1 Espectroelipsómetro.

3.2.1.2. Metodología.

Se posicionó la muestra de ámbar en la platina del espectroelipsómetro, como se muestra en la figura 3.2, de tal forma que la luz proveniente de la fuente (Generador de

Estados de Polarización, PSG) incida en un área que no contenga inclusiones y que la luz reflejada estuviera direccionada hacia el centro del analizador (detector). La fuente y el analizador se colocaron formando un ángulo de inclinación de 60° respecto a la normal a la superficie de la muestra, en el plano de incidencia; es decir, la detección ocurre al ángulo de reflexión.

En el software PHE se asignó el rango de medición comprendido de 250 nm a 1100 nm, con toma de datos espaciados cada 5 nm. Para evitar cualquier factor de luz que afectara las mediciones, éstas se realizaron con la luz del laboratorio apagada.



Fig. 3.2 Muestra de ámbar posicionada en la platina del espectroelipsómetro.

3.2.2. Refractómetro de Abbe.

3.2.2.1. Equipo y calibración.

Para medir el índice de refracción se utilizó el Refractómetro de Abbe de la marca Bausch & Lomb, Cat. No. 33 46 10.

Antes de usar el refractómetro se debe comprobar si está correctamente calibrado, para lo cual se hace la medición de una pieza de índice de refracción conocido ($n= 1.5116$).

Se colocan unas gotitas de bromo naftaleno sobre el prisma de refracción y sobre ella se coloca la parte pulida de la pieza. Al observar por el ocular la línea divisoria de las partes clara y oscura, se hace coincidir la escala de la parte inferior con la cifra indicada en

la pieza. Si la línea que separa la parte clara de la oscura no coincide con el centro de las líneas cruzadas que se ven en la parte superior, se debe girar el tornillo de calibración hasta hacerlas coincidir.

Una vez calibrado el refractómetro, no se debe manipular este tornillo de calibración durante las mediciones.

3.2.2.2. Metodología.

La muestra de ámbar medida fue la muestra D ya que para este método la pieza a medir debe tener una cara lisa y pulida, lo que implica modificarla.

Se colocó una o dos gotas de bromo-naftaleno sobre la superficie del prisma de refracción y se limpió bien la superficie lisa y pulida de la muestra para que haga mejor contacto. La parte pulida de la muestra de ámbar se coloca sobre el prisma de refracción.

Observando por el ocular se busca la línea divisoria entre los campos claro y oscuro. Girando la perilla de ajuste del índice de refracción se localiza la línea divisoria de los campos claro y oscuro, entonces se gira la perilla para ajustar la dispersión y que dicha línea se observe sin ningún color y de la forma más nítida. Una vez hecho esto, se vuelve a girar la perilla de ajuste del índice de refracción para desplazar la línea divisoria justo a la mitad de las dos líneas cruzadas, como se muestra en la figura 3.3.

El valor indicado en la escala de la parte inferior nos indica el índice de refracción de la muestra que se está midiendo.

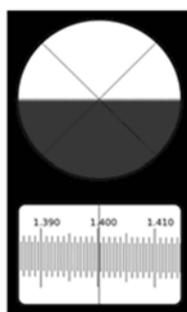


Fig. 3.3 Línea divisoria centrada.

3.2.3. Esparcimiento resuelto angularmente para la determinación del ángulo de Brewster.

3.2.3.1. Equipo.

El arreglo experimental se muestra en la figura 3.4, como fuente de luz se utilizó un láser no polarizado de He-Ne que emite de manera continua a 632.8 nm. Para polarizar la luz incidente, se colocó un polarizador lineal de calcita, tipo Glan-Thompson, con su eje de transmisión paralelo al plano de incidencia (polarización p). El haz emergente del polarizador, que tiene una polarización p , incide en la muestra de ámbar, la cual está posicionada en una mesa rotatoria (goniómetro).

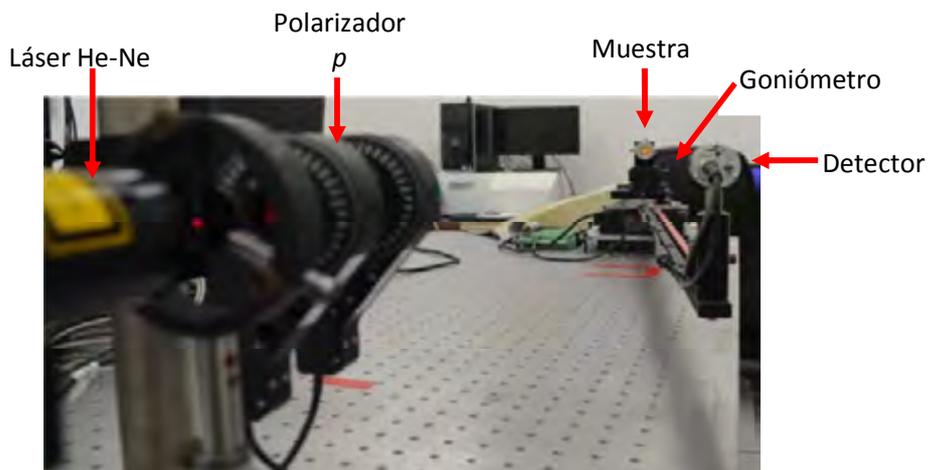


Fig. 3.4 Arreglo experimental para encontrar el ángulo de Brewster.

3.2.3.2. Metodología.

Se colocaron las muestras, previamente limpiadas, en posición vertical como se muestra en la figura 3.4. Se alinearon correctamente, de tal manera que la cara de la superficie iluminada coincidiera con el eje de rotación común a ambas monturas giratorias (la de la muestra y la del brazo con el detector). Para ello, se aseguró que el haz de luz reflejado por la muestra coincidiera siempre con el área efectiva del sensor. Se giró la mesa rotatoria de tal forma que el haz reflejado presentara una mínima intensidad, lo cual ocurre al ángulo de Brewster para cada muestra (dado que las muestras fueron pulidas por los artesanos, su superficie no es perfectamente lisa, por lo que presentan scattering

respecto a la longitud de onda a la que fueron iluminadas, lo que genera que no se obtenga una señal nula en reflexión).

Se tiene como datos el índice de refracción de $n_1 = 1$ (aire) y el ángulo de Brewster encontrado. Entonces al despejar de la ecuación (2.47) el valor del índice de refracción n_2 , se tiene que $n_2 = \tan(\theta_B)$; es así como se determina el valor del índice de refracción de la muestra medida.

3.3. Espectroscopia Raman.

3.3.1. Sistemas Raman.

Las muestras de ámbar de Chiapas se analizaron con dos sistemas Raman. Dichos sistemas se encuentran en el Laboratorio de Espectroscopia Raman en el Centro de Investigaciones en Óptica A. C., Unidad Aguascalientes.

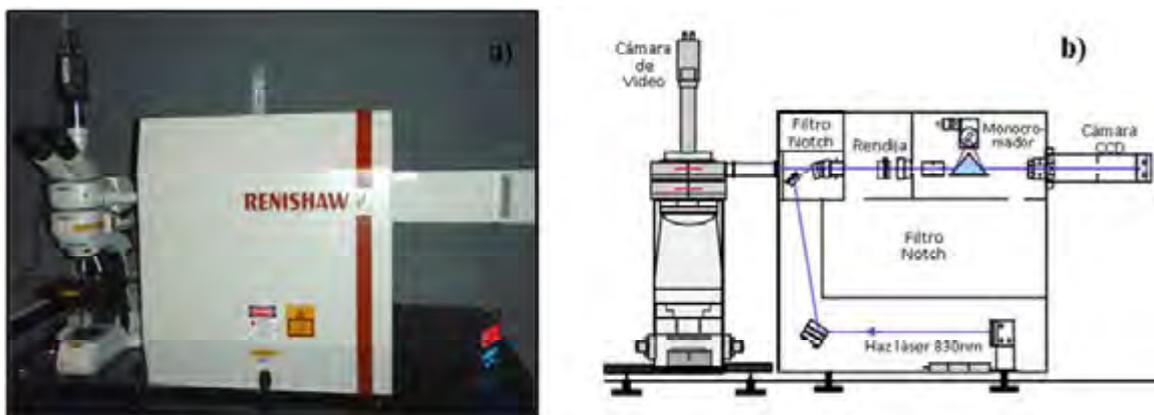


Fig. 3.5 a) Equipo Raman comercial (Renishaw, modelo 1000B), b) diagrama esquemático.

El primer sistema es un espectrómetro Micro-Raman Renishaw, modelo 1000B, el cual está equipado con un diodo láser (Renishaw serie HPMIR) que emite en el infrarrojo cercano, en 830 nm, y con una potencia máxima de 300 mW. Tiene un filtro notch, el cual es usado como un divisor de haz para guiar el haz láser hacia el microscopio ensamblado y también para eliminar la luz Rayleigh en el camino de retorno. El monocromador tiene una

rejilla de 600 líneas/mm con una resolución de 4 cm^{-1} . Como detector se tiene una cámara CCD (RenCam) enfriada termoeléctricamente a $-70 \text{ }^\circ\text{C}$, con 576×384 píxeles. Este sistema está acoplado a un microscopio Leica (Modelo DMLM) que tiene 3 objetivos (5x, 20x y 50x) con una cámara de video para la visualización de la muestras. Se utiliza un software GRAMS/32 para el control de las funciones de este sistema Raman. En la figura 3.5 se muestra dicho sistema.

El segundo es un sistema VIS-Raman convencional ensamblado en el laboratorio de Espectroscopia Raman del Centro de Investigaciones en Óptica, A. C., Unidad Aguascalientes, el cual consta de los siguientes elementos (ver figura 3.6):

- Un láser de He-Ne (Melles Griot) como fuente de excitación, que tiene una línea de emisión en 632.8 nm y una potencia máxima de 17 mW .
- Un filtro de interferencia (Edmund Scientific-FWHM $\pm 2 \text{ nm}$).
- Un filtro holográfico (Súper Notch-Plus™).
- Un monocromador (Jobin-Yvon, modelo HR 460) con una resolución espectral de 0.05 nm que cuenta con una rejilla de difracción de 1200 líneas/mm.
- Microscopio Axioskop 2.
- Como detector se tiene una cámara CCD de 256×1024 píxeles (modelo CCD-3000 Spectrum One) enfriada por aire.
- Tarjeta de interface GPIB-IEEE 488 de National Instruments.
- Software SpectraMax (Galactic) para el control del sistema Raman.

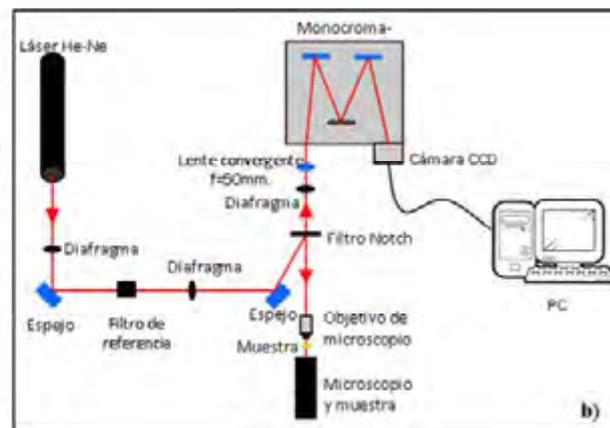


Fig. 3.6 Sistema Raman Convencional a) Diagrama del arreglo utilizado, b) Diagrama esquemático.

3.3.2. Medición y preparación de espectros Raman.

Las muestras se limpiaron cuidadosamente y se colocaron sobre la platina del microscopio de tal forma que el objetivo del microscopio se pudiera enfocar en el área más transparente y pura (sin inclusiones) de cada pieza de ámbar. Además, se aseguró que la medición se realizara en la primera superficie de cada muestra.

Ambos sistemas Raman se calibraron a la frecuencia de 520 cm^{-1} del espectro Raman de una oblea de Silicio. Es importante mencionar que para las mediciones en el sistema Renishaw, la calibración se realizó constantemente, aproximadamente cada 10 mediciones; en cambio, en el sistema convencional basta con calibrarlo una sola vez al iniciar las mediciones.

Para las mediciones en el sistema Renishaw, se ajustó la potencia del láser en el rango de 100% a 1%. Esta potencia se consideró dependiendo del color e inclusiones que presenta cada muestra. Para las muestras que presentan un color más oscuro o con muchas inclusiones, se tuvo que disminuir la potencia del sistema, ya que se comportan como un cuerpo negro, absorben mucha energía y por consiguiente, se dañan las muestras.

La señal Raman obtenida en el sistema comercial se midió en el rango de 200 cm^{-1} a 1800 cm^{-1} con un tiempo de muestreo en el detector de 30 segundos. El sistema convencional (integrado en el CIO-Ags.) tiene la capacidad de medición en el rango de 200 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} , sin embargo la medición se realizó en el rango de 2500 cm^{-1} a 3700 cm^{-1} , ya que es la región en la cual el sistema comercial no tiene alcance de medición y es donde se tiene información respecto a las vibraciones de estiramiento C-H y O-H. Cabe señalar que en el rango de 1800 cm^{-1} a 2500 cm^{-1} no se tiene información relevante, por lo tanto, no se tomó en cuenta.

3.3.3. Procesamiento de datos.

Los espectros Raman fueron medidos en 3 diferentes áreas de cada muestra, esto con el fin de verificar si presentaban algún cambio en cada medición.

Para el análisis de cada espectro se tuvieron las siguientes consideraciones:

- Se eligieron los picos en las frecuencias más características de la muestra en estudio, entre ellos el pico más intenso.
- La línea base de los picos elegidos fue corregida (con el fin de reducir los efectos de la fluorescencia); es decir, se trazó una recta eligiendo dos puntos en la base de

cada pico; luego, esta recta se subtrae en intensidades con los picos del espectro inicial, obteniéndose un espectro o banda linealizada.

- Se obtuvieron las gráficas con las intensidades normalizadas, tomando como referencia la banda con mayor intensidad centrada en 1440 cm^{-1} .

Para ambos sistemas se realizó el mismo procedimiento de análisis.

3.4. Espectro de emisión de fluorescencia.

Se determinó el espectro de emisión de fluorescencia para muestras de ámbar de Chiapas, utilizando dos distintas longitudes de onda monocromáticas de excitación. Para efectos de validar el prototipo se estudiaron varias muestras, para los fines de este trabajo de tesis se presentan solamente los espectros correspondientes a la muestra que exhibe la mayor fluorescencia.

3.4.1. Equipo.

Para observar la fluorescencia del ámbar, se excitó la muestra con una fuente de luz láser UV (370 nm) y un láser de Ar (457 nm). Con un espectrómetro se obtuvo el espectro de emisión de fluorescencia, utilizando una fibra óptica para guiar la luz hacia el sensor (modelo USB4000, Ocean Optics).

3.4.2. Metodología.

Se iluminó la muestra con cada una de las fuentes y se posicionó la fibra óptica en la región donde se observó mayor fluorescencia en el ámbar, de tal forma que la fibra óptica no midiera la luz de la fuente, sino que únicamente detectara la fluorescencia del material. En la figura 3.7 se muestra el arreglo utilizado.



Fig. 3.7 Arreglo utilizado para medir el espectro de emisión fluorescente del ámbar.

Capítulo 4

Resultados y discusiones.

4.1. Medición del índice de refracción.

4.1.1. Espectroelipsometría.

Debido a la irregularidad de la superficie que presentaban las muestras fue difícil encontrar la posición adecuada de la muestra para que el haz reflejado incidiera en el analizador del espectroelipsómetro (las muestras se midieron en su estado comercial final, sin preparación o cortes especiales). También se tuvo el cuidado de medir el haz reflejado que correspondiera a la primera superficie, ya que se podía observar un segundo haz reflejado el cual correspondía a la superficie inferior (en muestras transparentes de ámbar).

Es importante mencionar, que el software comercial PHE arroja los resultados de los parámetros elipsométricos Psi (φ) y Delta (Δ) en función de la longitud de onda incidente. Por lo tanto, se desarrolló un algoritmo en el software MATLAB para que, a partir de estos parámetros, se pudiera calcular y graficar el índice de refracción complejo de la muestra bajo estudio (ecuaciones 2.27 y 2.28). Este algoritmo matemático corresponde a la Aproximación de Medios Efectivos (Effective Medium Approximation, EMA), el cual se asocia a una descripción de frontera simple, entre el aire y el ámbar.

En la gráfica de la figura 4.1, se muestra la gráfica del índice de refracción y el coeficiente de extinción que presenta el ámbar de Chiapas (muestra G), el ámbar del Báltico (muestra color amarilla) y de la muestra falsa en función de la longitud de onda de la luz incidente. Se observa que el índice de refracción del ámbar de Chiapas es muy similar al que presenta la muestra falsa; esto indica que no es un parámetro que se pueda utilizar para poder diferenciar entre un ámbar auténtico y uno falso, mediante ésta técnica. Para el ámbar se encontró un índice de refracción de 1.4606 y 1.4640. El ámbar del Báltico presentó un índice de refracción de 1.1861 y 1.1900. La muestra falsa de ámbar tiene un índice de refracción de 1.4768 y 1.4718. Ambos valores del índice de refracción corresponden para las longitudes de onda de incidencia de 632.8 nm y 589 nm, respectivamente.

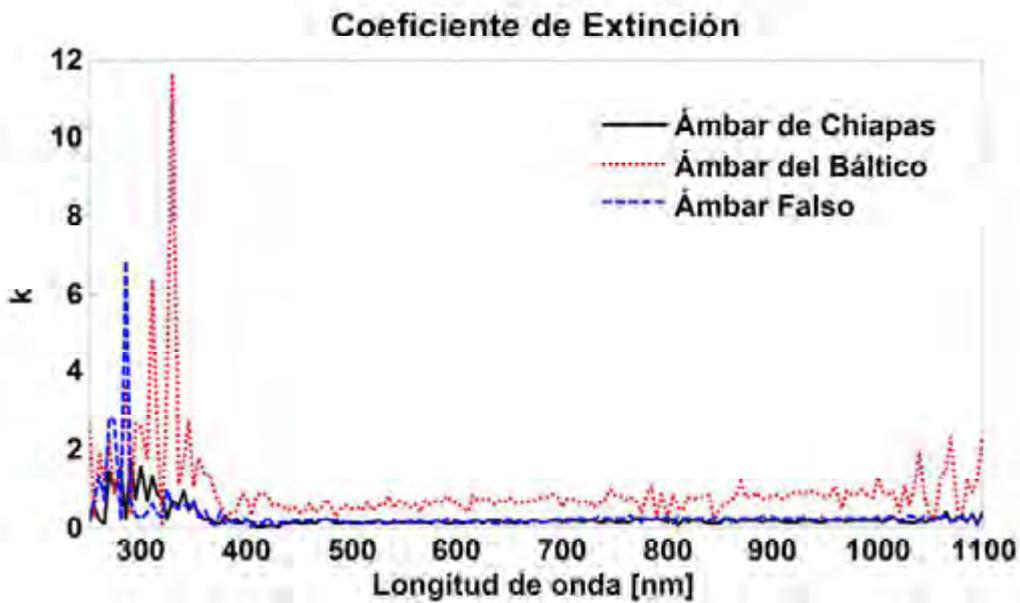
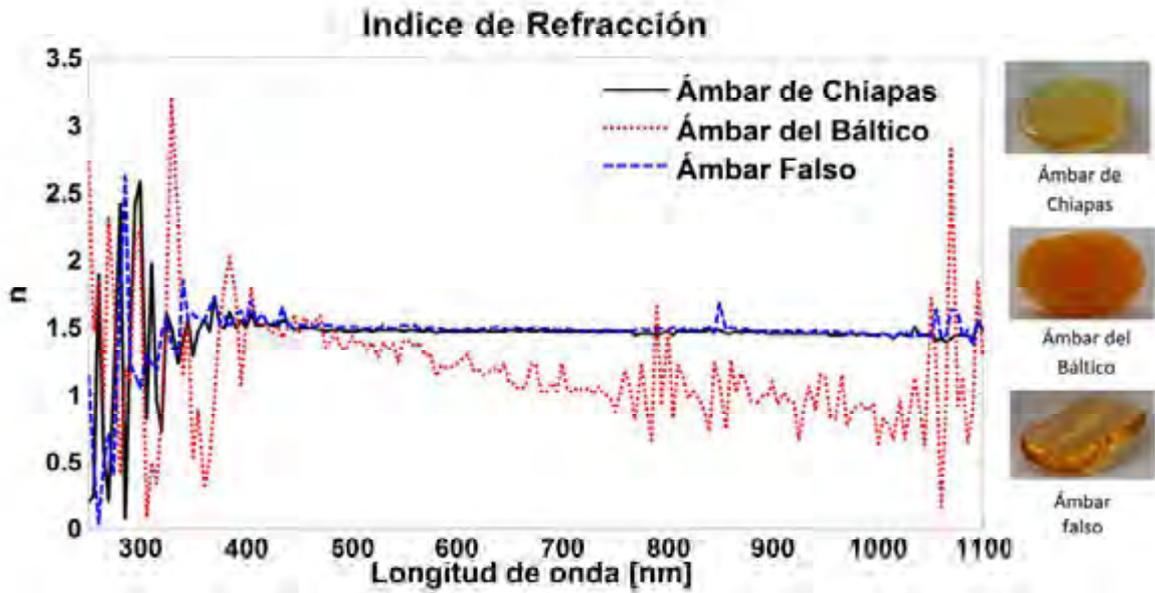


Fig. 4.1 Curva de dispersión para el índice de refracción, parte real e imaginaria, del ámbar de Chiapas.

4.1.2. Refractómetro de Abbe.

La medición se realizó sólo para una muestra debido a que se evitó dañar las muestras restantes. Para ello se preparó una muestra con una cara pulida y plana, y la otra cara esmerilada. El índice de refracción para el ámbar de Chiapas (muestra G) medido con el refractómetro de Abbe fue de $n = 1.547$.

4.1.3. Esparcimiento resuelto angularmente para la determinación del ángulo de Brewster.

Tabla 4.1. Ángulo de Brewster e índice de refracción encontrado para cada muestra medida.

Muestra	Angulo de Brewster θ_B ($\pm 0.5^\circ$)	Índice de Refracción n
A	55	1.4282
B	57	1.5399
C	56	1.4826
D	56	1.4826
E	54	1.3764
F	53	1.3271
G	55	1.4282
H	55	1.4282
I	54	1.3764
J	53	1.3271
K	53	1.3271
L	53	1.3271
M	56	1.4826
N	55	1.4282
O	56	1.4826
P	50	1.1918
Q	56	1.4826
R	53	1.3271
S	53	1.3271
T	53	1.3271
U	56	1.4826
V	56	1.4826
W	57	1.5399

El ángulo de Brewster encontrado (con rango de error de $\pm 0.5^\circ$) así como el índice de refracción calculado se muestran en la tabla 4.1. El valor del índice de refracción puede depender del color de la muestra, ya que en muestras transparentes y de color amarillo claro es de aproximadamente 1.3271. Cuando las muestras son más oscuras, el índice de refracción es aproximadamente 1.5399. Es importante mencionar que las muestras se encuentran pulidas pero algunas de ellas no tienen caras planas por lo que el haz reflejado no fue nulo.

Para la muestra de ámbar del Báltico en color amarillo se encontró el ángulo de Brewster en 56° , que corresponde a un índice de refracción de 1.4825; para la muestra falsa el ángulo de Brewster se encontró a 57° , que arroja un índice de refracción de 1.5398.

4.2. Espectroscopia Raman.

Las mediciones que se realizaron en diferentes áreas de la misma muestra presentaron la misma composición química. Se observó que los compuestos que constituyen a las muestras se presentan en diferentes porcentajes.

Con el fin de tratar más en la composición química del ámbar de Chiapas se realizaron comparaciones cualitativas entre los espectros medidos en el laboratorio y los espectros Raman de la referencia de base de datos de moléculas biológicas [20].

En muestras que presentan muchas inclusiones, que no se encuentran completamente pulidas o que tienen una tonalidad de color rojo oscuro o negro, no se pudo obtener el espectro debido a que la ganancia de la señal Raman es muy pobre y el fondo de fluorescencia cubre totalmente al espectro Raman. Una pequeña fracción de la luz que llega a la muestra se manifiesta como dispersión Raman; la mayoría es dispersión Rayleigh. En consecuencia, la dispersión Raman es altamente ineficaz. Si una muestra es fluorescente, generalmente debida a impurezas presentes en la muestra, el espectro Raman se oculta en uno de fluorescencia.

4.2.1. Ámbar de Chiapas.

Región 200-1800 cm^{-1} .

En la figura 4.2 se muestra el espectro Raman de la muestra A de ámbar de Chiapas, obtenido con el espectrómetro Renishaw (con las condiciones descritas en la sección experimental). Los espectros de todas las muestras se encuentran en el apéndice B.

En este espectro se tiene una banda centrada en 557 cm^{-1} que pertenece a una deformación en plano en $\delta(\text{CCO})$ $\delta(\text{COC})$ con un hombro con intensidad débil en 521 cm^{-1} .

Se observa una banda intensa centrada en 675 cm^{-1} y 780 cm^{-1} que corresponde al modo de vibración de estiramiento $\nu(\text{CC})$. Una banda ancha e intensa en 720 cm^{-1} con un hombro débil en 745 cm^{-1} .

Aparecen dos bandas centradas entre 930 cm^{-1} y 980 cm^{-1} . La primera, localizada en 937 cm^{-1} corresponde a $\rho(\text{CH}_2)$, y la segunda ubicada en 975 cm^{-1} pertenece al modo de vibración de torsión $\rho(\text{CH}_3)$.

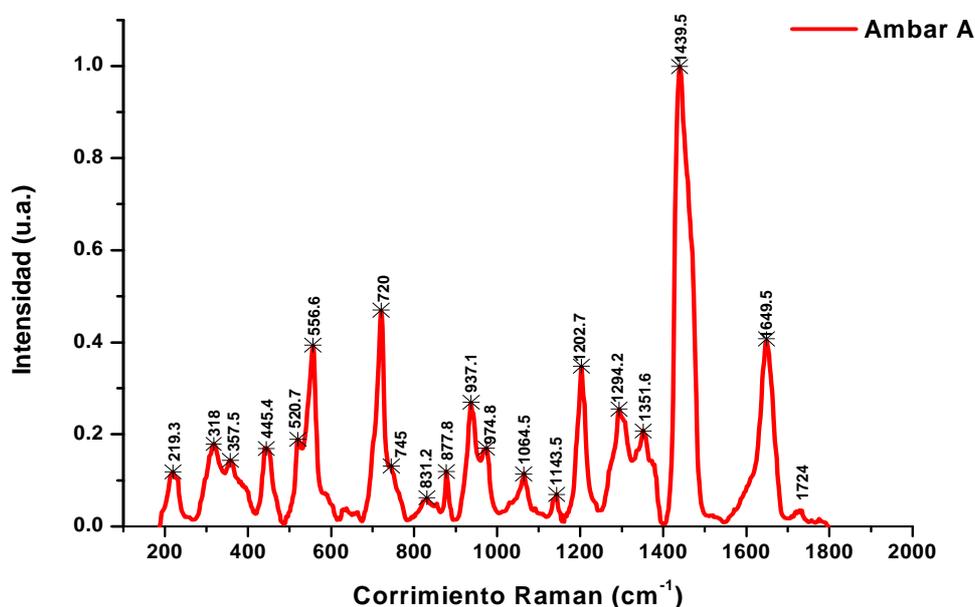


Fig. 4.2 Espectro Raman del Ámbar de Chiapas en el rango de 200-2000 cm^{-1} .

Las bandas de 1144 cm^{-1} y 1203 cm^{-1} corresponden al modo de vibración de respiro de anillo $\nu(CC)$ y $\delta(CCH)$, respectivamente, del componente diterpenoide del ámbar. Los terpenoides, algunas veces son referidos como isoprenoides; según su estructura química, los terpenoides se pueden clasificar en base al número de unidades de isopreno presentes. Los diterpenoides son terpenoides de 20 carbonos, entre ellos se incluye el fitol (hidrofóbico de la clorofila), las hormonas giberelinas y los ácidos de las resinas de las coníferas.

En la banda de 1294 cm^{-1} se encuentra un pico con intensidad media que pertenece al modo de vibración tijereteo $\delta(CH_2)$, al igual que en 1352 cm^{-1} que corresponde a la vibración de deformación fuera del plano $\delta(CH_2)$.

En 1064 cm^{-1} se tiene una vibración de $\nu(C = C)$. Una banda intensa centrada en 1650 cm^{-1} aparece en todos los espectros de las muestras de ámbar y corresponde a un alto contenido de $\nu(C = C)$ (grupo de metileno exocíclico) [21].

La banda más importante en esta región aparece centrada en 1440 cm^{-1} correspondiente a la vibración tijereteo $\delta(CH_2)$. En todos los casos, esta banda tiene una intensidad mucho más alta que la que está centrada en 1650 cm^{-1} . Esto significa un alto grado de maduración en las muestras.

Región 2500-3700 cm^{-1} .

En la figura 4.3 se muestra el espectro obtenido en el sistema integrado en el CIO-Ags., comprendido entre 2500 cm^{-1} a 3700 cm^{-1} en cada muestra.

En la región de $2600\text{-}3100\text{ cm}^{-1}$ el espectro es similar para todas las muestras. Se observa una banda ancha alrededor de 2926 cm^{-1} y un hombro en 2873 cm^{-1} que pertenece al grupo C-H de estiramiento. Además, en la banda de 3468 cm^{-1} se tiene un pico con poca intensidad que pertenece a la vibración O-H; esta banda al parecer es un indicador que coincide con la degradación de la muestra, ya que cuando la muestra tiene mayor degradación es mayor la intensidad de este pico. En la sección 4.2.1.1 se profundiza más acerca del tema de degradación.

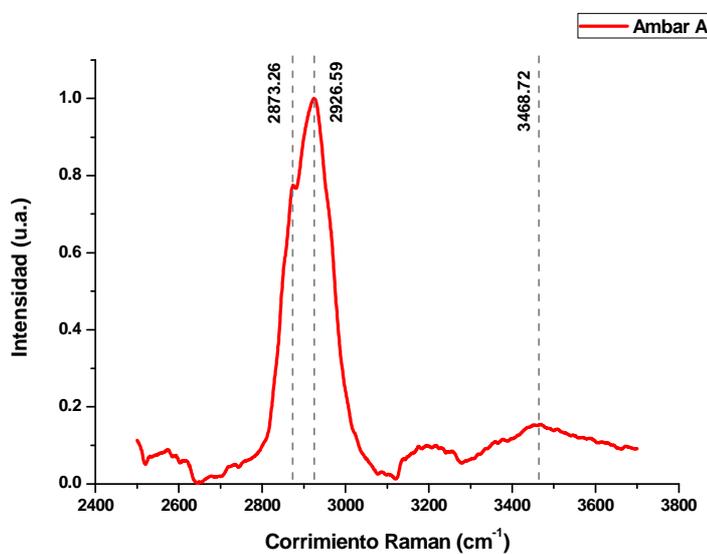


Fig. 4.3 Espectro Raman del Ámbar de Chiapas en el rango de 2500 cm^{-1} - 3700 cm^{-1} .

En la gráfica de la figura 4.4 se muestra la razón de intensidades de los dos picos encontrados, en donde se nota que no hay mucha variación ya que la mayoría se mantiene en el rango de 0.7; las muestras (H, I, J, N, O, Q, R, Y) que tienen un valor mayor a 0.8 presentan un color más oscuro.

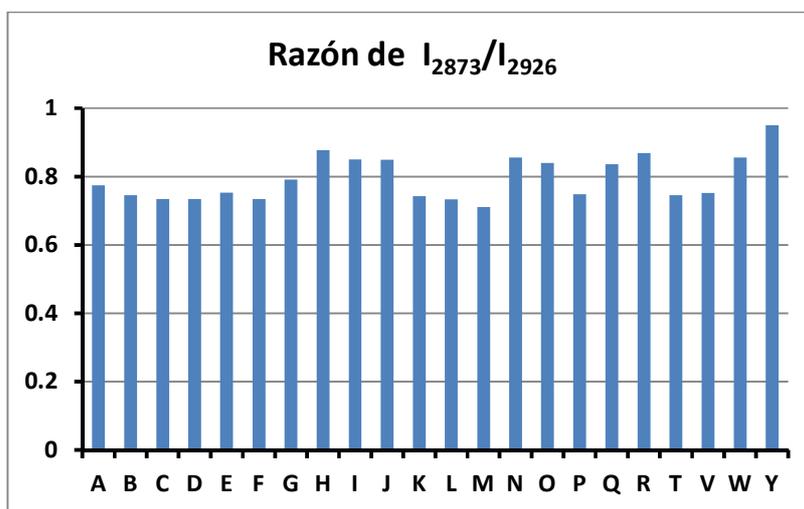


Fig. 4.4 Razón de intensidades de los picos centrados en 2873 cm^{-1} y 2926 cm^{-1} .

En la tabla 4.2 se resume la información del espectro, el número de onda donde se encuentran las bandas con mayor intensidad y a qué modo vibracional corresponden. Es importante mencionar que el espectro de cada muestra es muy similar, por tanto únicamente se muestran los datos de la muestra de ámbar A.

Tabla 4.2. Bandas Raman e Intensidad para la muestra de ámbar A.

Bandas Raman (cm⁻¹)	Modo vibracional
521 (s, sh)	CCC (deformación fuera del plano)
557 (s)	$\delta(CCO)$ $\delta(COC)$ (deformación fuera del plano)
720 (s)	$\nu(CC)$
745 (m, sh)	$\nu(CC)$
937 (m)	$\rho(CH_2)$
975 (mw)	$\rho(CH_3)$ (torsión)
1064 (m)	$\nu(C = C)$
1144 (w)	$\nu(CC)$ (respiro de anillo)
1203 (s)	$\delta(CCH)$, $\delta(C - O)$
1294 (m)	$\delta(CH_2)$, $\delta(CH_3)$
1352 (m)	$\delta(CH_2)$ (deformación fuera del plano)
1440 (vs)	$\delta(CH_2)$, $\delta(CH_3)$ (tijereteo)
1650 (s)	$\nu(C = C)$
1724 (w)	(C = O) (estiramiento)
2873 (m)	$\nu(CH_2)$
2926 (m)	$\nu(CH_2)$
3468 (w)	C-H (estiramiento)

Abreviaciones: w, débil; m, medio; s, Intenso; mw, medio débil; vs, muy intenso; sh, hombro.
Junto con sus asignaciones ν =vibración de tensión y δ = vibración de torsión.

4.2.1.1. Maduración del ámbar.

En la figura 4.4 se muestra la gráfica de la razón de intensidades en las bandas alrededor de 1650 cm⁻¹ y 1440 cm⁻¹ de los espectros Raman de las muestras de ámbar. No se puede determinar con precisión la edad de cada una de ellas pero se puede corroborar que corresponden a muestras de ámbar auténtico, ya que todas las muestras tienen una razón de intensidades en el rango de 0.27 a 0.52. Las muestras G, J, P, Q, R, T y U tienen

mayor maduración que las demás. Reportes previos estiman que el ámbar de México tiene una edad aproximadamente de 30-20 millones de años, originados en el periodo geológico después del Oligoceno y antes del Mioceno [22-23].

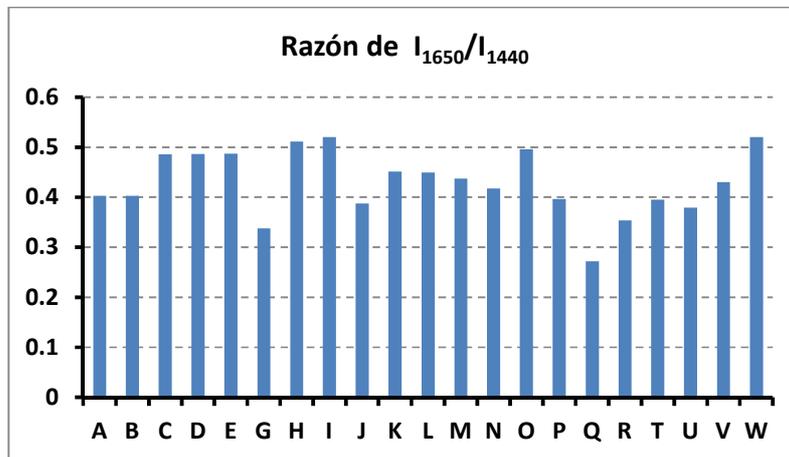


Fig. 4.5 Maduración. Razón de intensidades I_{1650}/I_{1440} .

Adicionalmente a las razones de intensidades (I_{1650}/I_{1440}) mencionadas en la figura 4.5, también se hizo una razón de intensidades considerando los picos 720 cm^{-1} y 556 cm^{-1} (ver figura 4.6). Se encontró que tienen una relación directa con la maduración como se observa en las muestras N, Q y U que habían sido las que presentaban un grado de maduración más alto. También se correlacionan con el color de cada ámbar, ya que para las muestras que tienen una razón de intensidades más pequeña corresponde a ámbares con inclusiones o presentan color más oscuro (muestras C, H, N y Q), y para muestras puras y de color amarillo la razón de las intensidades es mayor (muestras D, K, L y T).

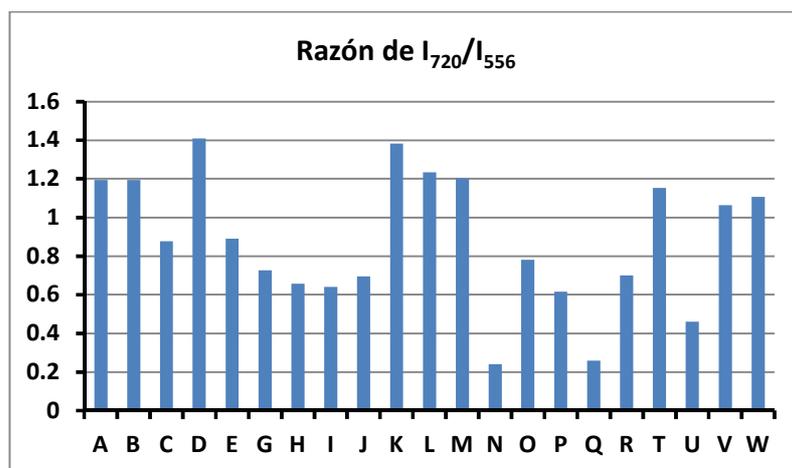


Fig. 4.6 Razón de intensidades en la banda de 556 cm^{-1} y 720 cm^{-1} .

4.2.1.2. Degradación del ámbar.

Estudios previos [24,25] mencionan que en algunos materiales ocurre fotodegradación (transformación fotoquímica) causada por la absorción de radiación de luz (UV, VIS o IR). El proceso de degradación genera cambios en la composición química del grupo carbonilo e hidroxilo de los polímeros por la influencia de luz UV, localizados en los picos 1650 cm^{-1} y 1724 cm^{-1} del espectro Raman y que corresponden a las vibraciones de estiramiento de C=C (grupo olefínico) y C=O (grupo carbonilo), respectivamente.

En la gráfica de la figura 4.7 se muestra la razón de intensidades correspondiente a los picos en 1724 cm^{-1} y 1650 cm^{-1} . En las muestras de ámbar se observa que la razón de los picos es mayor para la muestra Q que, como se observa en la figura 4.5, tiene la mayor maduración; sin embargo, en la muestra O también la razón es grande pero tiene un grado de maduración menor que la muestra Q. Por lo tanto, se podría decir que la degradación ocurre independientemente del grado de madurez de la muestra.

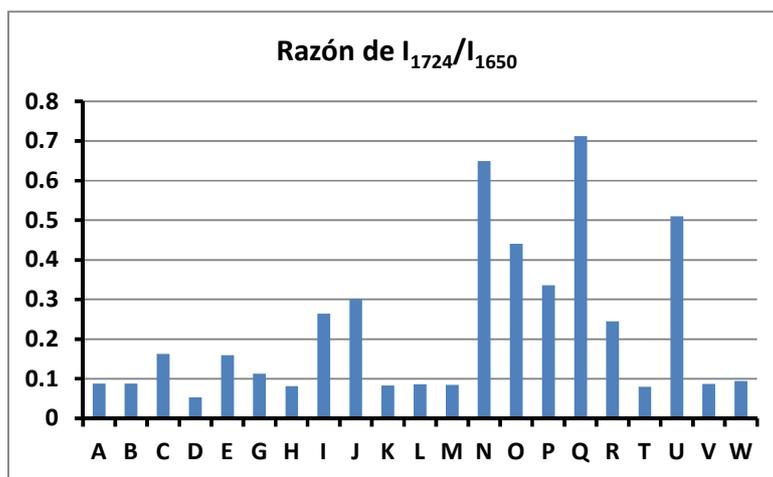


Fig. 4.7 Degradación de las muestras. Razón de intensidades I_{1724}/I_{1650} .

4.2.2. Ámbar del Báltico.

Con el fin de hacer una comparación de ámbar de otras regiones, se realizó la medición del espectro Raman de 4 muestras de ámbar del Báltico (de color amarillo, naranja, verde y rojo, respectivamente) provenientes de minas localizadas en Rusia. Las fotografías se encuentran en el apéndice A. En la figura 4.8 se muestra el espectro Raman correspondiente al ámbar del Báltico en color amarillo blanquecino. La intensidad en la banda de 1650 cm^{-1} es muy débil. La razón de picos que determina la maduración se

encuentra en 1650 cm^{-1} y 1452 cm^{-1} la cual es de 0.087; la razón de intensidades en 1724 cm^{-1} y 1650 cm^{-1} es mucho mayor que 1, esto indica que tiene un grado elevado de degradación de la muestra [11].

Se puede observar que el espectro del ámbar de Chiapas es diferente al espectro del Báltico; únicamente coincide en la banda centrada en 1450 cm^{-1} , aunque presenta una intensidad muy débil comparándola con la del espectro del ámbar de Chiapas (figura 4.2). Esta muestra medida presenta mayor degradación, como lo muestra la gran intensidad del pico 1724 cm^{-1} , y tal vez esto influye en las diferencias tan marcadas que se observan entre el ámbar del Báltico y el de Chiapas.

Para todas las muestras de ámbar del Báltico se observó que la razón de intensidad del pico situado en 1600 cm^{-1} y en 3100 cm^{-1} con respecto al de 1724 cm^{-1} crecen de manera proporcional; por lo tanto, se puede decir que el pico en 1600 cm^{-1} también está relacionado con la degradación de la muestra. Este mismo comportamiento se observa en la muestra H de ámbar de Chiapas.

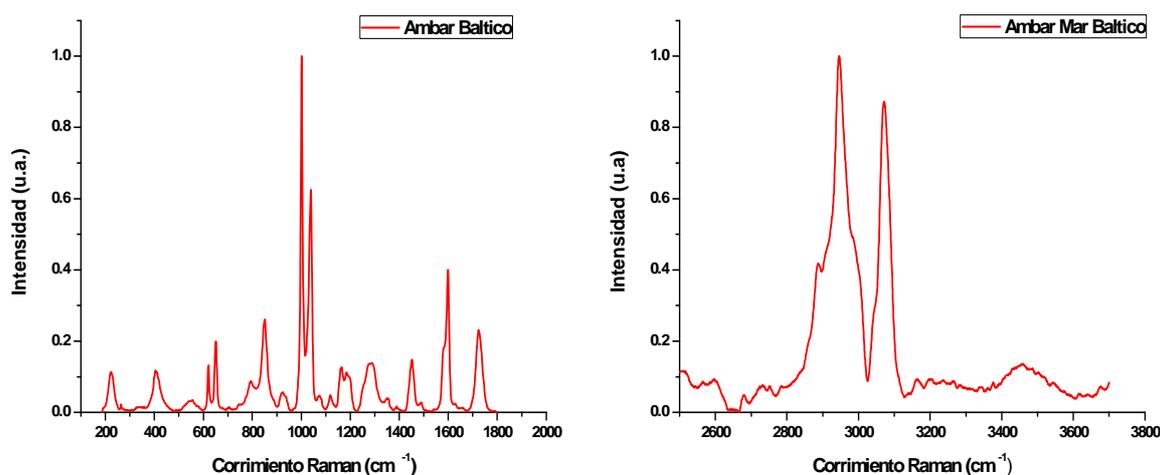


Fig. 4.8 Espectro Raman correspondiente al ámbar del Báltico.

4.2.3. Muestras de ámbar falso.

La figura 4.9 corresponde a los espectros Raman de muestras de imitación de ámbar. Claramente se puede observar que existe una gran diferencia con respecto al del ámbar de Chiapas (figura 4.2). El pico máximo se encuentra centrado en la banda de 700 cm^{-1} , seguido por otro con menor intensidad en 830 cm^{-1} . Como se puede observar en la

figura, el espectro Raman del ámbar falso es muy similar al espectro que presenta un portaobjetos, por lo tanto ambos están hechos por algún material a base de vidrio con algún color.

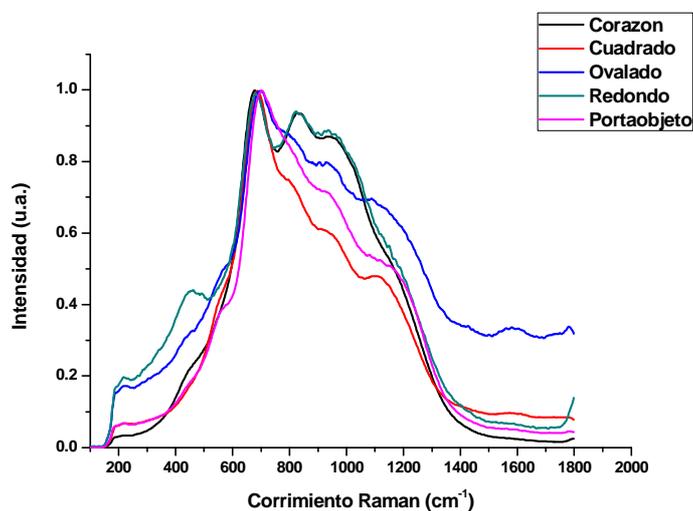


Fig. 4.9 Espectro Raman correspondiente a muestras de ámbar falso.

4.2.4. Comparación del ámbar de Chiapas, ámbar del Báltico y ámbar falso.

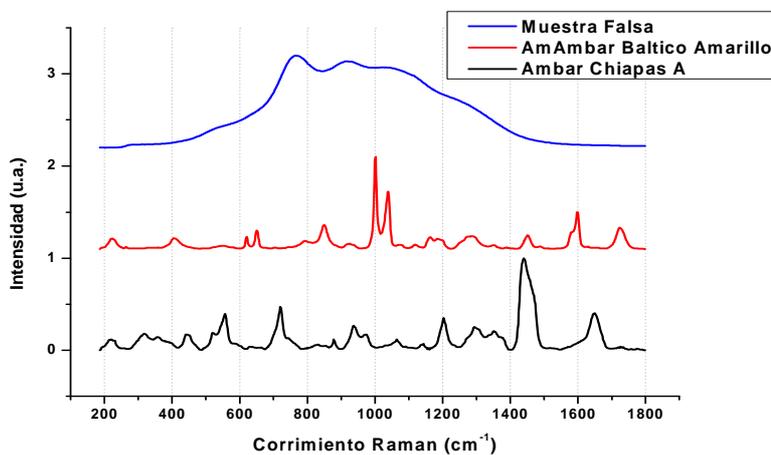


Fig. 4.10 Comparación del espectro Raman de una muestra de ámbar de Chiapas, ámbar del Báltico y ámbar falso.

En la figura 4.10 se muestra los espectros de una muestra de ámbar de Chiapas, una del Báltico y una de imitación de ámbar. Anteriormente, se explicó las diferencias que existen entre los espectros del ámbar de Chiapas con la del Báltico y una muestra falsa.

4.2.5. Comparación con la base de datos de espectros de moléculas biológicas.

Se realizó un comparativo del espectro Raman del ámbar de Chiapas con los espectros que se encuentran en la base de datos de moléculas biológicas [20], particularmente los espectros correspondientes a grasos y ácidos grasos.

Con el espectro Raman del ácido Oleico (figura 4.11) y Vaccénico (figura 4.12) se tiene un parecido en la banda centrada en 1440 cm^{-1} y 1650 cm^{-1} . Existe también una diferencia de intensidades, en donde coincide con la del ámbar de Chiapas al ser la banda más intensa la que se encuentra en 1440 cm^{-1} . Con el espectro de Trioleína (figura 4.13) coincide en tres bandas: 1440 cm^{-1} , 1650 cm^{-1} y 1724 cm^{-1} .

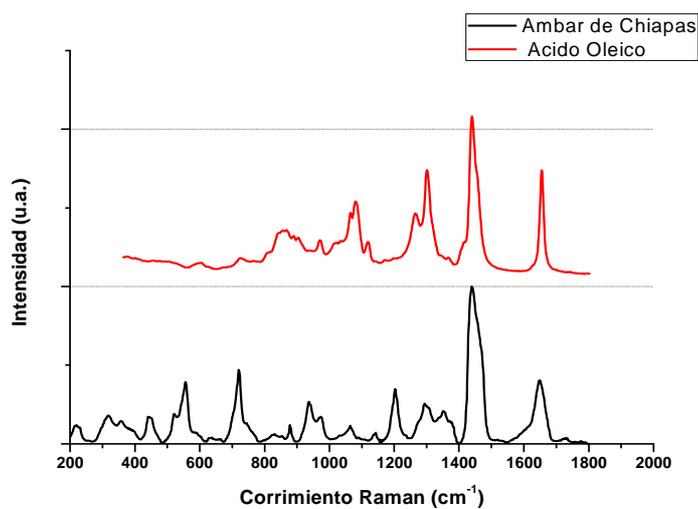


Fig. 4.11 Comparación del espectro Raman del ámbar de Chiapas con el ácido Oleico.

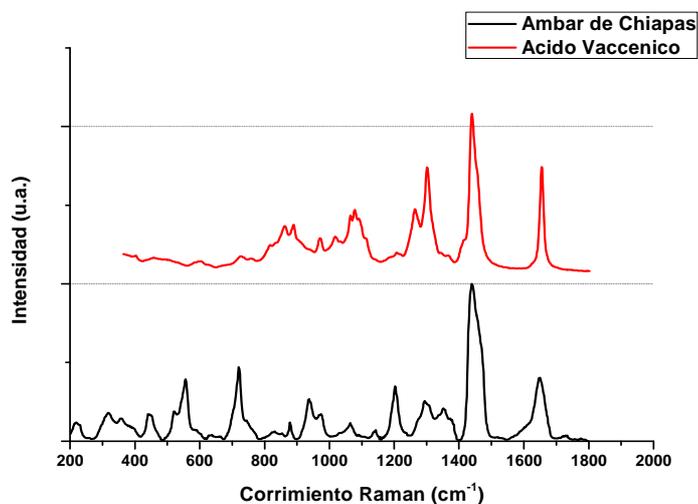


Fig. 4.12 Comparación del espectro Raman del ámbar de Chiapas con el ácido Vaccénico.

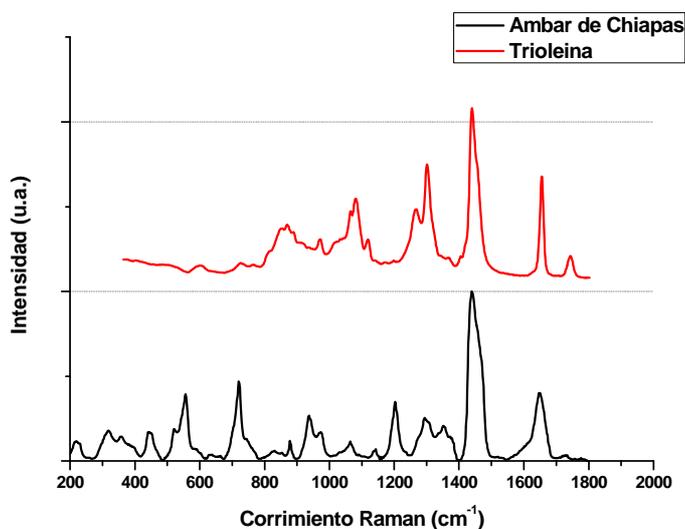


Fig. 4.13 Comparación del espectro Raman del ámbar de Chiapas con el graso Trioleina.

Los espectros de Trilinoleina (figura 4.14) y Trilinolenin (figura 4.15) coinciden en las bandas de 1440 cm^{-1} y 1650 cm^{-1} , pero las intensidades de los picos están invertidas. Aunque los picos Raman del ámbar coinciden con los de los ácidos grasos, aun no se puede decir con exactitud cuáles son los ácidos grasos que contienen, ya que para ello habría que ampliar la base de datos de espectros estándar.

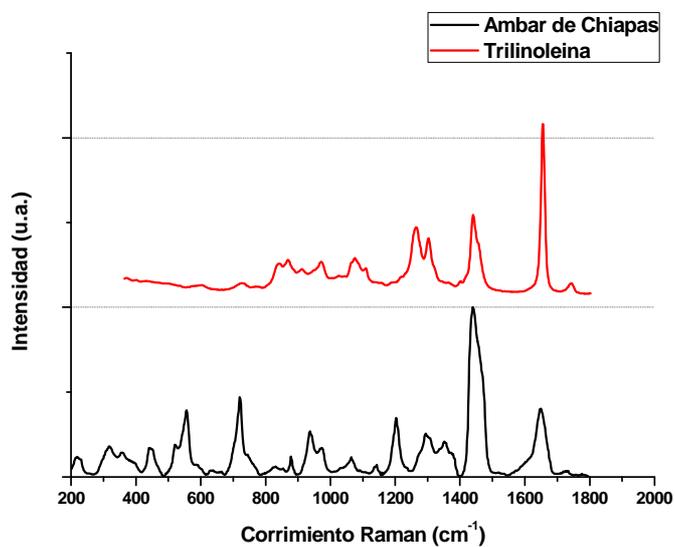


Fig. 4.14 Comparación del espectro Raman del ámbar de Chiapas con el ácido graso Trilinoleina.

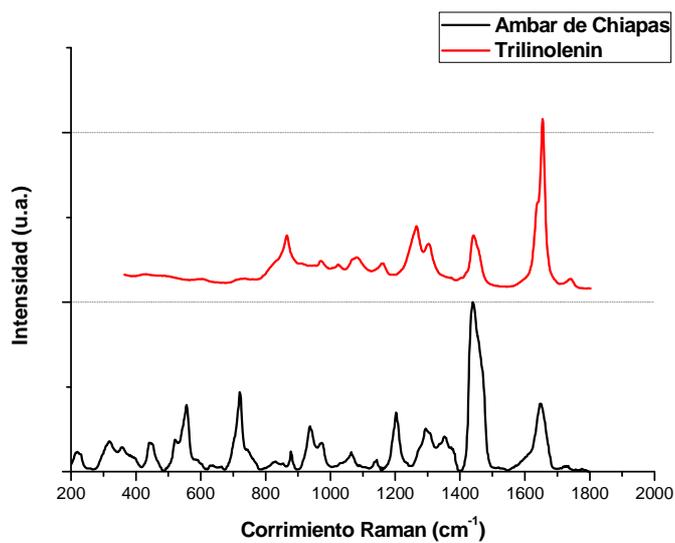


Fig. 4.15 Comparación del espectro Raman del ámbar de Chiapas con el graso Trilinolenin.

En estudios realizados mencionan que el ámbar del Báltico está compuesto por ácido succínico. Por tal motivo, se hizo la comparación de este ácido con el espectro Raman del ámbar de Chiapas, mostrado en la figura 4.16, encontrando que coincide en las bandas de 937 cm⁻¹, 1294 cm⁻¹, 1440 cm⁻¹ y 1650 cm⁻¹.

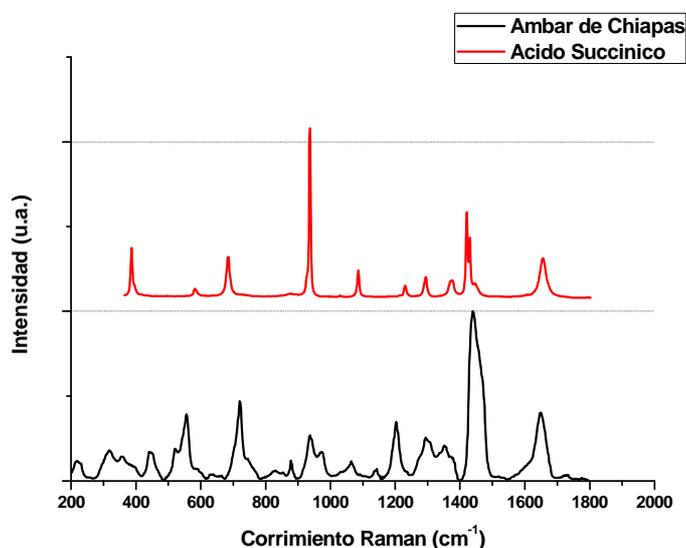


Fig. 4.16 Comparación del espectro Raman del ámbar de Chiapas con el ácido Succínico.

4.3. Espectro de emisión de fluorescencia.

4.3.1. Fuente de excitación: Láser UV (370 nm).

El láser UV que se utilizó para excitar el ámbar emite a una longitud de onda de 370 nm. En la figura 4.17 se presenta el espectro de emisión de fluorescencia del ámbar de Chiapas y de la muestra falsa de ámbar. La fluorescencia del ámbar de Chiapas se encuentra en la banda de 390 nm a 700 nm, presentando un máximo de emisión en 504 nm. Se observa también, que la muestra de ámbar falso no emite fluorescencia a esa longitud de excitación, simplemente refleja la luz incidente que corresponde a la fuente láser UV. Por referencia también se muestra en la figura el espectro de emisión de la fuente de iluminación.

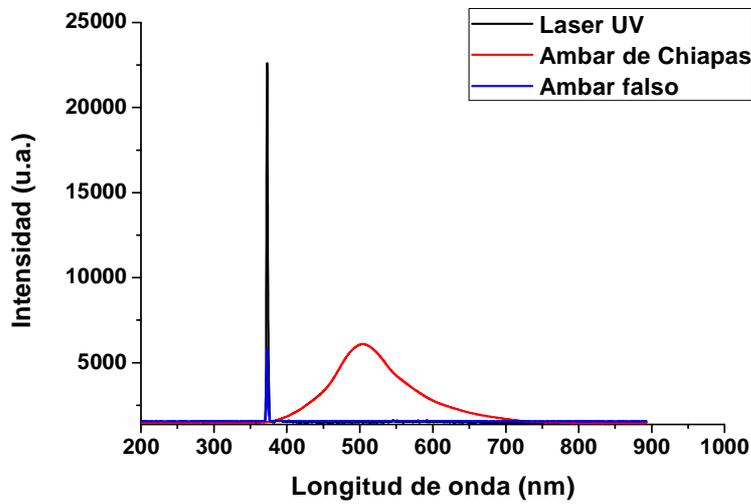


Fig. 4.17 Espectro de emisión de fluorescencia de las muestras de ámbar excitadas a 370 nm.

4.3.2. Fuente de excitación: Láser de Argón (emisión a 457 nm).

También se utilizó como fuente de iluminación un láser de Argón con emisión a 457 nm. La siguiente gráfica exhibe los resultados obtenidos para la muestra de ámbar empleadas en la sub-sección anterior. Por referencia también se muestra en la figura el espectro de emisión de la fuente de iluminación.

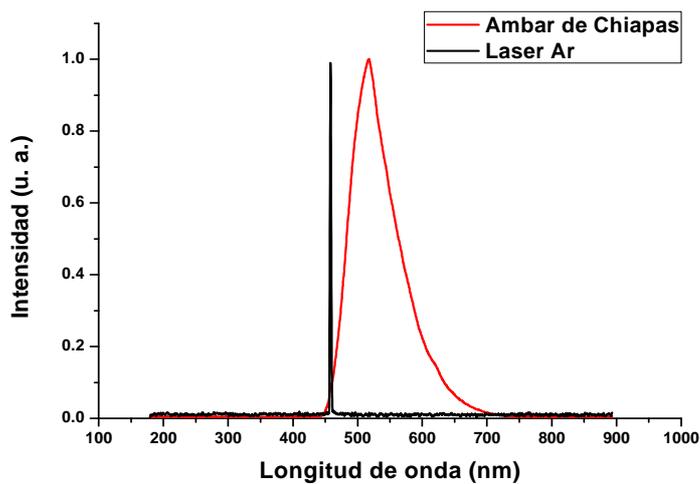


Fig. 4.18 Espectro de emisión de fluorescencia de las muestras de ámbar excitadas a 457 nm.

Capítulo 5

Conclusiones.

5.1. Medición del índice de refracción.

Existen varias técnicas para la medición del índice de refracción de un material, pero eso no significa que los valores serán iguales en todos los métodos, pues en todos ellos se utiliza una distinta longitud de onda incidente. Los equipos que se utilizaron para medir el índice de refracción del ámbar de Chiapas, del ámbar del Báltico y de ámbar falso fueron el espectroelipsómetro, el refractómetro de Abbe y el esparcimiento resuelto angularmente para la determinación del ángulo de Brewster.

Con los resultados obtenidos se concluye que el índice de refracción del ámbar de Chiapas es muy parecido al de la muestra de imitación de ámbar. Por tanto, este parámetro no nos permite diferenciar entre un ámbar auténtico de uno falso.

De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana del Ámbar de Chiapas (NOM-152-SCFI-2003), el índice de refracción del ámbar de Chiapas es de $n = 1.552$. El método para determinar el índice de refracción en la Norma es utilizando el refractómetro a través de una prueba por análisis comparativo. La muestra utilizada posee dimensiones de 1 mm de espesor, perfectamente pulidas sus caras y en lo posible libre de impurezas (no tiene limitaciones respecto a su tamaño, sólo respecto a su espesor). La medición del índice de refracción se efectúa por medio indirecto, colocando la muestra de ámbar en disolventes de índice de refracción conocido. Cuando el índice de refracción coincide con el disolvente, el ámbar no se observa en el solvente, esto indica que el índice de refracción del ámbar corresponde al del disolvente. En este caso, el solvente que presentó mejor resultado fue O- diclorobenceno. Una seria limitación que presenta esta prueba, es que reporta un solo valor para el índice de refracción, cuando los resultados aquí presentados muestran que éste depende del tipo de ámbar, pues el color, tono y transparencia son variables que lo afectan.

5.2. Espectroscopia Raman.

La espectroscopia Raman es una técnica que, por su carácter no destructivo, es una herramienta alterna para caracterizar los compuestos químicos que se encuentran en las muestras de ámbar de Chiapas. A pesar de que algunas muestras presentan un color

oscuro o tienen internamente muchas inclusiones, se pudo obtener el espectro Raman de la mayoría de las muestras.

Se obtuvo el espectro Raman de las muestras de ámbar de Chiapas y como resultado se tiene que presentan la misma composición química, independientemente del color y la pureza de cada una de ellas, siendo diferentes los valores de las intensidades en algunos picos. Además, se pudo diferenciar el ámbar de Chiapas de muestras falsas hechas de vidrio, así también como del ámbar del Báltico.

Los espectros de las muestra analizadas son similares. Algunos cambios en los espectros podrían estar asociados a la variación en el grado de maduración, degradación, el color e inclusiones de las muestras. Los resultados obtenidos difieren mínimamente en algunas regiones del espectro de los estudios realizados anteriormente en muestras de ámbar de México, pero a pesar de ello, los picos más significativos son similares (en realidad este resultado publicado no menciona si se trata de ámbar de Chiapas, pues también se han localizado minas de ámbar en Nayarit y Jalisco).

La comparación de la razón de las bandas en la región del número de onda alrededor de 1650 y 1440 cm^{-1} , I_{1650}/I_{1440} , proporciona información sobre la maduración de cada muestra dando como resultado que las muestras de ámbar estudiadas, ciertamente son de ámbar y no de copal. Aunque no se puede determinar la edad precisa, se puede utilizar una base de datos con espectros de referencia como una aproximación de la edad relativa de la muestra para la identificación y comparación de resinas desconocidas. El resultado obtenido no puede ser correlacionado directamente con la edad; las condiciones geológicas como la temperatura, presión, nivel de agua y no sólo tiempo, pueden afectar el valor obtenido en la razón de intensidades; por lo tanto, sólo puede ser utilizado como un indicador general del nivel de maduración de la muestra. El nivel de degradación de las muestras es independiente del grado de maduración que presentan. Fundamentalmente, el ámbar de Chiapas está compuesto de ácidos grasos como el ácido Oleico. Para una exacta identificación de éstos se tiene que incrementar la librería de espectros estándares.

En Chiapas se cuenta con minas en diferentes municipios del Estado, principalmente en Simojovel de Allende y otros 7 municipios colindantes a éste; por lo tanto, los estudios aquí generados ayudarán a identificar la procedencia del ámbar, así como su grado de maduración y degradación.

5.3. Espectro de emisión de fluorescencia.

Al excitar con una fuente de luz de longitud de onda en el ultravioleta (370 nm), se observó que la pieza de ámbar auténtico presenta fluorescencia, con un máximo de emisión en 504 nm. Al realizar la misma prueba con un ámbar falso, la muestra no presentó fluorescencia. Resultados similares se presentaron cuando se excitaron ambas muestras con luz monocromática a 457 nm.

Para efecto del diseño del prototipo se optó por una fuente de luz, que no sea dañina para los ojos de las personas, con una longitud de onda a 463 nm, la cual también excita al ámbar presentando fluorescencia.

Capítulo 6

Plan de negocios: Diseño y desarrollo del prototipo.

6.1. Descripción general del proyecto de investigación.

6.1.1. Naturaleza del proyecto.

El ámbar es de los pocos materiales de joyería aún no explotado comercialmente en el grado que corresponde a su potencial estético, se considera como la única piedra preciosa y semipreciosa de origen vegetal que pertenece al grupo de las gemas orgánicas como el azabache, las perlas, los corales, etc.

Aunque existen otros países en donde se ha encontrado ámbar, los de mejor calidad son los de México y de la República Dominicana (por su transparencia, variedad de color, tonalidad y dureza). En México, el ámbar se localiza en el Estado de Chiapas en los municipios de Simojovel de Allende, Huitiupan, Totolapa, El Bosque, Pueblo Nuevo Solistahuacan, Pantelho y San Andrés Durazanal.

Después de ser extraído de la mina, los artesanos y escultores, procesan el ámbar en bruto, convirtiéndolo en una gran variedad de joyería montadas en materiales preciosos y esculturas de ámbar de alta calidad; existen piezas de ámbar que tienen un alto valor científico por sus inclusiones de flora, insectos e incluso ranas y lagartijas ya extintos.

La importancia que tiene comercialmente es en el sector de la joyería. El precio de esta joya depende del tipo de tallado, el color, tonalidad, inclusiones y montado que presente. Hoy en día, existe en el comercio la falsificación de dichas piedras y esto afecta directamente a la economía de los artesanos que extraen y procesan el ámbar. Esto trae consigo un desprestigio al ámbar, pues el consumidor los adquiere con desconfianza, ya que no existe un medio accesible y confiable para la autenticación de su origen.

6.2. Organización.

6.2.1. Misión.

Incorporar un prototipo al mercado productivo, el cual sea capaz de validar la autenticidad del Ámbar de Chiapas.

6.2.2. Visión.

El desarrollo de este prototipo le dará un valor agregado a la comercialización del ámbar que tanto prestigio y promoción mundial le han dado al Estado de Chiapas y a nuestro país, coadyuvando así al posicionamiento del ámbar de Chiapas en los mercados nacionales e internacionales.

6.2.3. Objetivo.

Se diseñará y construirá un prototipo experimental sencillo, económico, robusto y portable para la autenticación del ámbar.

6.2.4 Estudio técnico del proyecto.

Tabla 6.1 Estudio técnico del producto.

Estudió técnico del producto	
Descripción del producto o servicio.	Prototipo experimental sencillo, económico, robusto y portable para la autenticación del ámbar de Chiapas.
Ubicación de la empresa.	León, Guanajuato, México. Loma del Bosque No. 115. Col. Lomas del Campestre. Tel.: (477) 441 4200 Ext. 305
Instalaciones.	Centro de Investigaciones en Óptica, A. C.

6.2.5. Ventajas Competitivas.

Actualmente no existe en el mercado algún dispositivo que sea competencia para nuestro prototipo. Con el fin de garantizar al consumidor la autenticidad del ámbar, los comerciantes realizan pruebas empíricas a las piezas de ámbar, que de alguna manera resultan destructivas y pocos confiables.

Este prototipo experimental se diseñará y construirá en base a componentes ópticos y electrónicos de bajo costo, a fin de que el costo total del dispositivo sea accesible para los comerciantes y consumidores de ámbar, y tenga buen recibimiento en el mercado.

6.2.6. Estructura del negocio.

Este proyecto se llevará a cabo bajo la asesoría de una persona experta en el tema de óptica y polarización de la luz. En la tabla 6.2 y 6.3 se presentan la descripción de puesto de las personas involucradas en el desarrollo del proyecto.

Tabla 6.2 Descripción del puesto: Titular del proyecto de tesis.

Descripción del Puesto	
Puesto	Titular del proyecto de Tesis. Guadalupe López Morales. Ingeniera Electrónica.
Objetivo del Puesto	Diseñar y construir un prototipo experimental para la autenticación del ámbar de Chiapas.
Descripción de las responsabilidades y funciones del puesto	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Estudiar los temas que implica el desarrollo del prototipo. ➤ Realizar pruebas de campo para comprobar la efectividad del prototipo.

Tabla 6.3 Descripción del puesto: Asesor del proyecto de tesis.

Descripción del Puesto	
Puesto	Asesor del proyecto de Tesis. Dr. Rafael Espinosa Luna. Investigador Titular C.
Objetivo del Puesto	Asesorar y apoyar al alumno durante la investigación.
Descripción de las responsabilidades y funciones del puesto	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Brindar las herramientas necesarias para la realización del proyecto.

6.3. Mercadotecnia.

6.3.1. Objetivo de la investigación y necesidades de información.

El objetivo de la investigación y la necesidad de la información para este proyecto son determinar si el prototipo a construir es completamente factible para establecerse en el mercado actual. Algunos puntos a lograr en este proyecto son:

- Que el prototipo experimental sea del completo agrado para la sociedad.
- Abastecer las necesidades del mercado.

6.3.2. Estrategias competitivas.

A través de encuestas y entrevistas se obtendrá la información necesaria para conocer la opinión de las personas que están relacionadas directamente con el comercio del ámbar. En base a los resultados, se realizará la investigación y las pruebas ópticas pertinentes para el desarrollo del prototipo experimental.

Se formulará una estrategia competitiva para ofrecer el producto a empresas y personas que estén interesadas en la compra y venta de este prototipo.

6.3.3. Segmentación de mercados y perfiles de clientes.

Este prototipo experimental está dirigido para personas de un nivel económico bajo, medio y alto. En particular, para la industria y personas que se dedican a la venta del ámbar en ferias y exposiciones en toda la república mexicana. También a empresarios dedicados a la compra-venta de joyería de ámbar.

También estará dirigido a organizaciones como el Consejo Regular del Ámbar de Chiapas, localizado en la ciudad de Simojovel de Allende, Chiapas y la Secretaria de Economía del Estado de Chiapas.

6.3.4. Mezcla de la mercadotecnia utilizando las (4P's).

Tabla 6.4 Mercadotecnia utilizando las 4P's.

Producto	<ul style="list-style-type: none">• Las técnicas ópticas para el estudio del ámbar se realizaran con los equipos con los que cuenta el laboratorio GIPYS del Centro de Investigaciones en Óptica. El prototipo experimental será construido con componentes ópticos y electrónicos de bajo costo pero de calidad.• Se diseñará con una presentación que se vea atractiva para el público y con la comodidad necesaria para su uso.
Precio	<ul style="list-style-type: none">• El precio total del dispositivo es de \$440.20
Plaza	<ul style="list-style-type: none">• La comercialización de este producto se puede dar en joyerías, en ferias y exposiciones del ámbar que se realiza en toda la república mexicana.
Promoción	<ul style="list-style-type: none">• La promoción del producto puede ser a través de sitios de internet.

6.3.5. Competencias.

Actualmente no se encuentra en el mercado algún dispositivo que se parezca al prototipo planteado.

6.3.6. Publicidad.

La publicidad que adoptaríamos sería una demostración de la funcionalidad del producto a la Secretaría de Economía, para que ésta brinde asesoría para la comercialización del producto. Otra opción es la publicación del prototipo en revistas científicas y periódicos, así como en sitios de internet.

6.3.7. Comercialización.

La opción más factible es a través de minoristas o mayoristas, ya que estos son los comercios más comunes encontrados en las zonas más concurridas.

6.4. Finanzas.

6.4.1. Objetivo y estudio financiero.

El objetivo del plan financiero es establecer una situación real de las necesidades y el movimiento monetario donde se realizará el diseño y construcción del prototipo experimental, así como el flujo de dinero y el análisis integral del laboratorio.

El estudio financiero proporciona una cercanía a la realidad de las circunstancias financieras que pudiesen presentar en la realización de este proyecto.

6.4.2. Fuentes de uso de dinero en efectivo.

El asesor de este proyecto de tesis es el encargado del laboratorio en donde se realizará la investigación. Se cuenta con los recursos suficientes y el equipo necesario para el desarrollo del prototipo.

6.4.3. Cálculos estimativos de gastos y costos para iniciar el negocio.

Tabla 6.5 Lista de precios.

Producto	Cantidad	Precio unitario	Subtotal
LED azul	1	\$7.00	\$7.00
LED verde	2	\$5.00	\$10.00
Potenciómetro	1	\$9.00	\$9.00
OPAM	2	\$8.60	\$17.20
Resistencias 1	4	\$0.80	\$3.20
Resistencias 2	2	\$0.80	\$1.60
Capacitores 1	4	\$1.70	\$6.80
Capacitores 2	3	\$0.80	\$2.40
Regulador de voltaje	1	\$9.00	\$9.00
Convertidor DC/DC	1	\$83.00	\$83.00
Pila	1	\$49.00	\$49.00
Microcontrolador	1	\$80.00	\$80.00
Pantalla LCD	1	\$112.00	\$112.00
Construcción del prototipo	1	\$50.00	\$50.00
Total			\$ 440.20

El costo total de construcción del prototipo experimental se presenta en la tabla 5. Es importante mencionar, que los precios corresponden a la compra de los productos por menudeo y que tenemos presente la posibilidad de fluctuaciones del mismo, dado que algunos componentes son importados del extranjero.

6.5. Conclusiones.

6.5.1. Viabilidad del proyecto de investigación.

Para la caracterización óptica de las muestras de ámbar se tiene acceso a los equipos ópticos de los laboratorios del Centro de Investigaciones en Óptica (CIO).

Además, para el desarrollo del prototipo experimental se cuenta con la disponibilidad de recursos financieros, humanos y materiales, lo cual hace que el proyecto de investigación sea viable.

6.5.2. Conclusiones generales.

El prototipo experimental se diseñará y construirá de tal forma que sea sencillo, robusto, de fácil operación para el usuario y de bajo costo, que permita comprobar la autenticidad del ámbar de Chiapas.

El desarrollo de este prototipo le dará un valor agregado a la comercialización del ámbar que tanto prestigio y promoción mundial le han dado al Estado de Chiapas y a nuestro país, además de favorecer el posicionamiento del Ámbar de Chiapas en los mercados nacionales e internacionales.

6.6. Diseño del prototipo experimental para verificar la autenticidad del Ámbar de Chiapas.

El diseño de la parte óptica del prototipo experimental está basado en los resultados de la respuesta fluorescente del ámbar auténtico y de muestras falsas.

6.6.1. Fuente de iluminación.

Con un arreglo de luz + monocromador se iluminó una muestra de ámbar en un rango de 200 a 800 nm, con el fin de determinar a qué longitud de onda presenta máxima

fluorescencia. El resultado fue que al ser excitada con luz de longitud de onda alrededor de 463 nm (color azul) presenta una alta fluorescencia (figura 6.1).

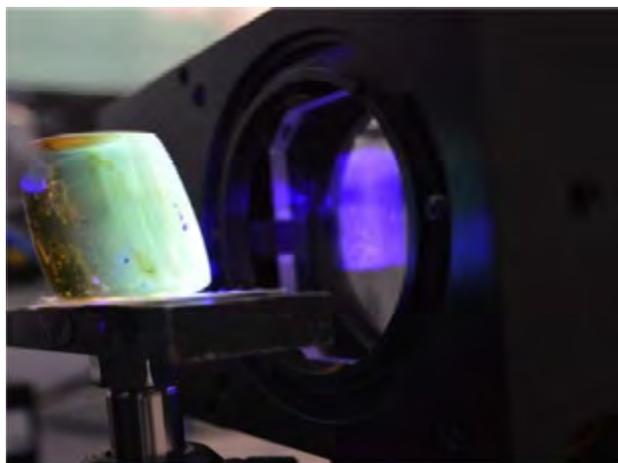


Fig. 6.1 Efecto de fluorescencia en el ámbar de Chiapas.

Con el objetivo de desarrollar un dispositivo portable, robusto y de bajo costo, se hizo necesario el considerar la incorporación de fuentes de iluminación y de detección de bajo costo, confiables y que no presentaran riesgo alguno para la salud del potencial usuario. Para identificar las fuentes de iluminación apropiadas se realizaron pruebas con dos LEDs de color azul, uno brillante y otro ultra-brillante. Los espectros de emisión de ambos se muestran en la figura 6.2.

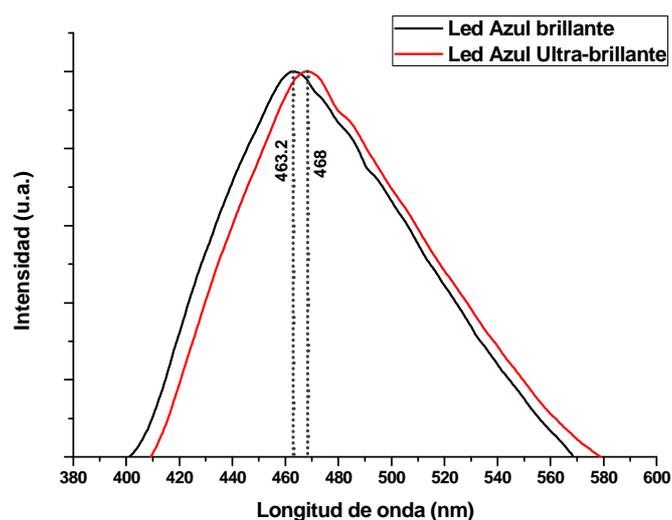


Fig. 6.2 Espectro de emisión de dos LEDs (fuente de iluminación).

El LED seleccionado como fuente de iluminación es uno que emite en el color azul a una longitud de onda de 463.2 nm (figura 6.3).



Fig. 6.3 LED azul brillante (463.2 nm).

El circuito que se utilizó para poder variar la intensidad de la fuente de iluminación consta de un potenciómetro (VR1) de 10 k Ω alimentado con un voltaje de 12 volts (B1), el cual limita la corriente que alimenta a un diodo LED azul (D1), como se muestra en la figura 6.4.

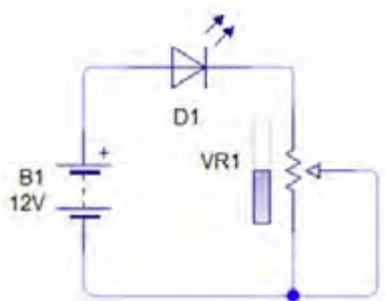


Fig. 6.4 Circuito electrónico de la parte de fuente de iluminación

6.6.2 Selección del sensor.

6.6.2.1 LED como sensor.

Se sabe que un LED, al polarizarlo eléctricamente de manera directa, emite luz mediante un flujo de corriente y que puede usarse como una fuente de iluminación. Pero al ser polarizado de manera inversa, éste emite un flujo de corriente muy pequeña al incidirle luz de la misma longitud de onda al que está diseñado.

Los fotodiodos tienen un espectro de longitud de onda a la cual son más sensibles, este comportamiento también lo presenta un LED cuando se polariza inversamente y es más sensible a la longitud de onda que éste emite. A mayor cantidad de luz que lo ilumine, más corriente fluirá.

6.6.2.2 LED sensor.

Al incidir luz con una longitud de onda de 463 nm en una muestra de ámbar, ésta emite un espectro de fluorescencia centrado alrededor de 504-550 nm, que corresponde al color verde del espectro electromagnético.

Se realizó la medición del espectro de emisión de cuatro diodos LED en color verde, con diferentes características, en la figura 6.5 se presenta el espectro de cada LED de prueba.

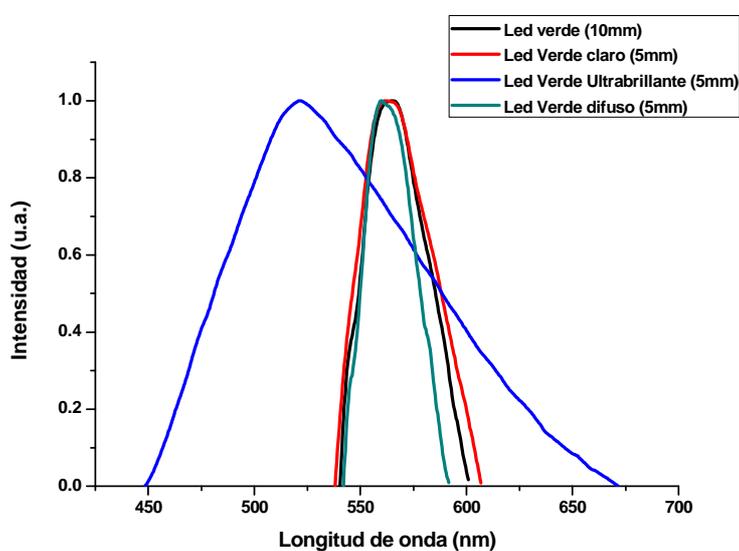


Fig. 6.5 Espectro de emisión de diferentes LEDs para determinar su uso como sensores de fluorescencia.

Para la selección del LED sensor, se buscó el que mejor se aproximara a la longitud de onda de la máxima fluorescencia, en este caso se eligió un LED verde difuso (ver figura 6.6) que es el que tiene un menor ancho espectral comprendido en 540 nm y 600 nm.



Fig. 6.6 LED verde difuso (560 nm).

6.6.2.3 Circuito del LED sensor.

Con el fin de que la señal generada por el sensor tenga mayor potencia se utilizaron dos LEDs (D2y D3) en color verde difuso como sensores (figura 6.7), polarizados inversamente.

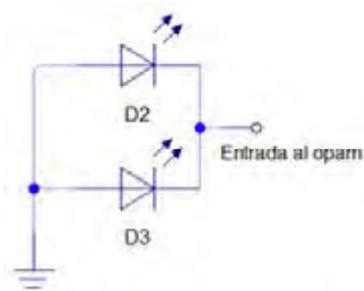


Fig. 6.7 Etapa de sensado.

6.6.3 Acondicionamiento de la señal.

6.6.3.1 Convertidor de corriente a voltaje.

La salida de la etapa de sensado genera una corriente muy pequeña en el rango de microamperes (μA) y esta señal puede tener ruido. Un circuito integrado que amplifica señales de baja potencia de manera eficaz y de alta calidad es un Amplificador Operacional (OPAM) [26]. Por tanto, se utilizó un convertidor de corriente a voltaje como se muestra en la figura 6.8. En la salida de este operacional se tiene una diferencia de potencial del orden de milivolts (mV).

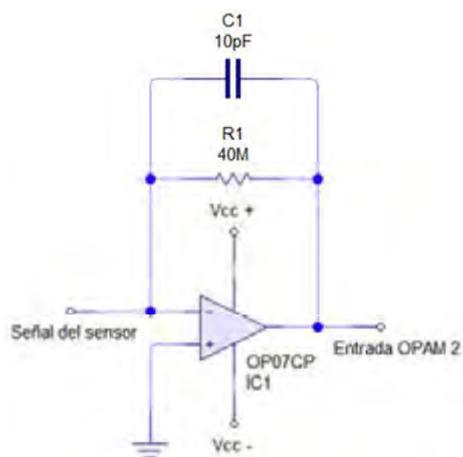


Fig. 6.8 Convertidor de corriente a voltaje.

IC1 es un operacional (OP07CP) configurado como convertidor de corriente a voltaje. Este circuito integrado necesita un nivel ultra-bajo de corriente de entrada, lo que es recomendable ya que el LED invertido sólo puede producir poca corriente. Además de cumplir las características requeridas presenta muy bajas pérdidas, una tensión de offset baja y estable, y mantiene una excelente linealidad y precisión.

R1 debe tener un valor lo suficientemente grande, en el orden de mega-ohms ($M\Omega$). La ganancia del amplificador es controlada por esta resistencia.

Debido a la baja señal de entrada, alta resistencia y ganancia del OPAM, dicha señal puede oscilar aleatoriamente. Por tanto, con una pequeña cantidad de capacitancia, en el orden de picofaradios (pF), se puede estabilizar la señal (capacitor cerámico C1).

6.3.2.2 Amplificación de señal.

La señal de entrada que se necesita para el microcontrolador debe estar en el rango de 0-5 volts, por tanto el voltaje obtenido del OPAM 1 deber ser amplificado. Esto se logró mediante el circuito de la figura 6.9, en donde se configuró el OPAM 2 como un amplificador no inversor.

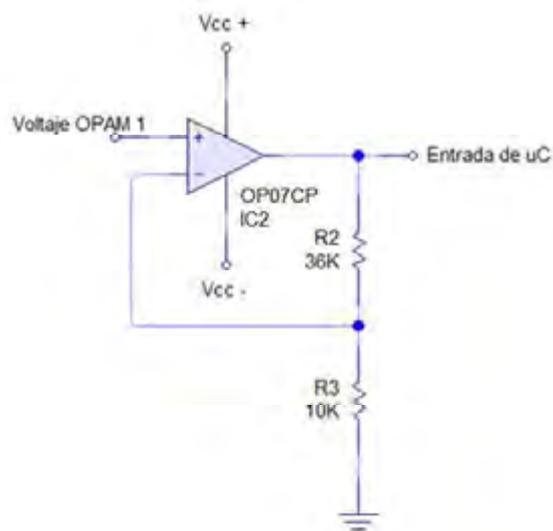


Fig. 6.9 Amplificador no inversor de voltaje.

6.6.4 Procesamiento de datos: Microcontrolador.

La señal analógica proveniente de la salida del OPAM 2 se convierte en señal digital mediante un microcontrolador, en el cual se tiene un programa que indica, a través de una pantalla LCD, si el objeto bajo estudio se trata de una muestra de ámbar de Chiapas o una muestra falsa, dependiendo del voltaje sensado por dos LEDs de color verde difuso.

6.6.5 Fuente de alimentación del circuito.

La fuente de alimentación para el circuito es una pila de corriente continua de 9 volts. Dicho voltaje se disminuyó por medio de un regulador de voltaje, debido a que el microcontrolador y el convertidor de DC/DC requieren un voltaje de 5 volts.

El voltaje requerido para el correcto funcionamiento de los circuitos operacionales es de ± 12 volts, por lo que se requiere un convertidor de DC/DC. Este convertidor opera de forma dual, ya que necesita un voltaje de entrada de 5 volts y en la salida se tiene ± 12 volts.

Nota: *se solicita el manejo discreto de esta información, pues está abierta la posibilidad de iniciar el proceso de patentamiento de este prototipo.*

Capítulo 7

Sugerencias. Trabajo a futuro.

La Norma Oficial Mexicana del Ámbar de Chiapas (NOM-152-SCFI-2003) menciona métodos de prueba para la identificación de ámbar auténtico; pero algunos de ellos son poco claros. Por ejemplo, el valor del índice de refracción que presenta la Norma no menciona a qué longitud de onda se realizó la prueba y tampoco se reporta ninguna incertidumbre de medición; además los valores para muestras distintas a las estudiadas en la Norma pueden variar, debido a que en el mercado las muestras de ámbar presentan diferente transparencia, color y pueden contener inclusiones de distinta índole. Por tanto, se sugiere que se adopte la determinación mediante el ángulo de Brewster, tal como se expuso en la sección 3.2.3, pues es más accesible, sencilla y brinda información acerca de las propiedades superficiales del ámbar, sin importar si presenta o no inclusiones.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la sección 4.2, se puede proponer la inclusión dentro de la Norma de la caracterización del Ámbar de Chiapas con espectroscopia Raman, ya que el espectro Raman del ámbar de Chiapas se mantiene constante independientemente de las características de la muestra. Esta prueba también servirá para discriminar entre un ámbar de millones de años de un copal de unos miles de años, lo que daría un valor agregado al Ámbar de Chiapas.

Anexo A Fotografías de las muestras estudiadas.

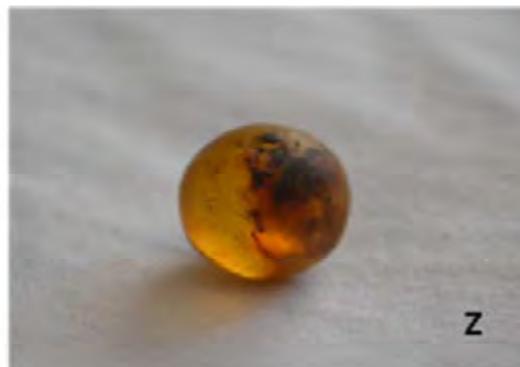
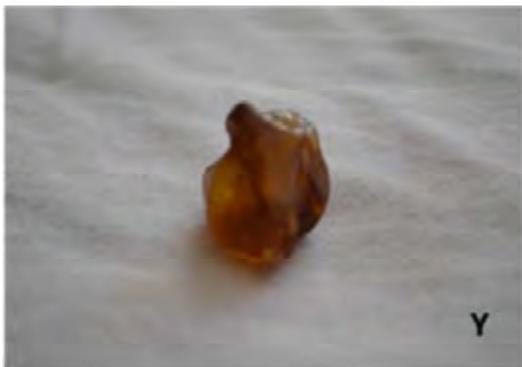
Ámbar de Chiapas.











Ámbar del Báltico



Muestras de ámbar falso

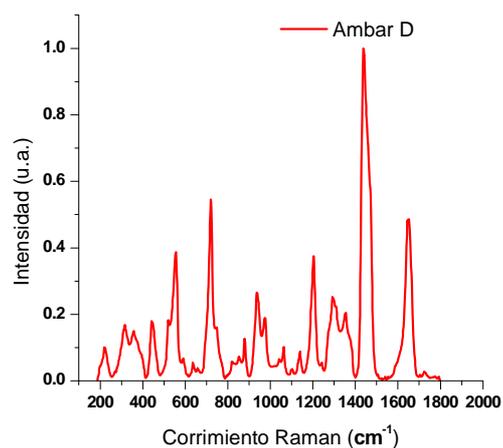
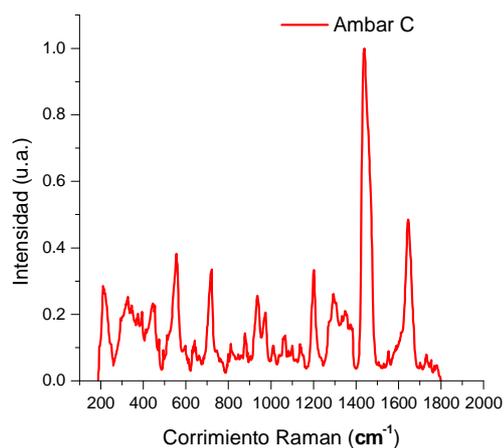
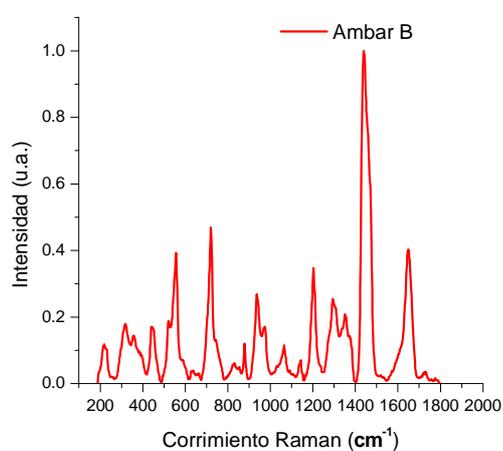
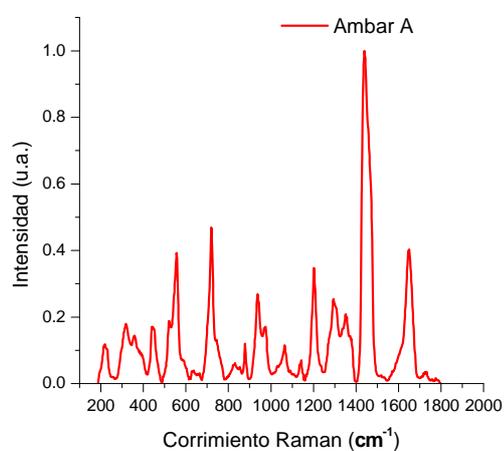


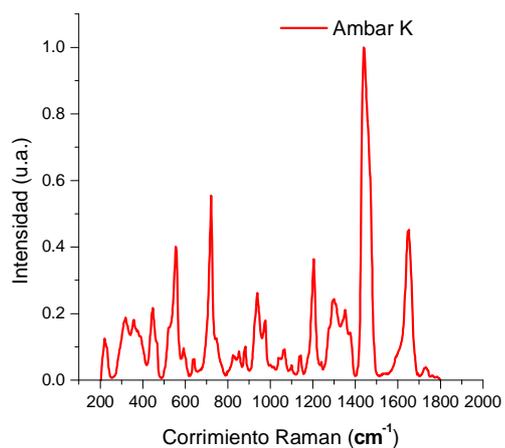
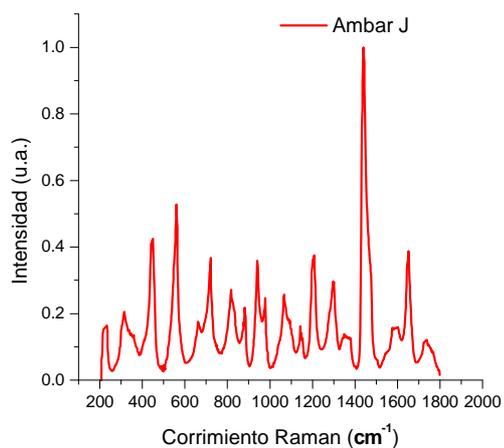
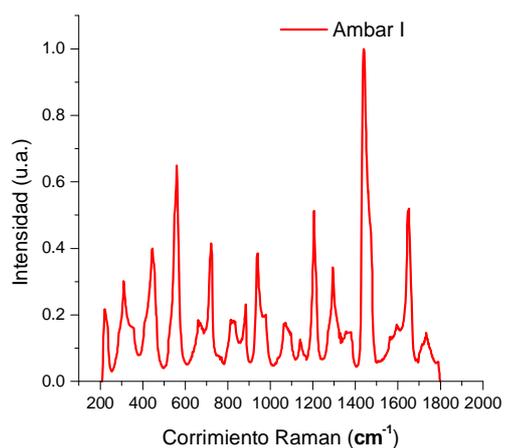
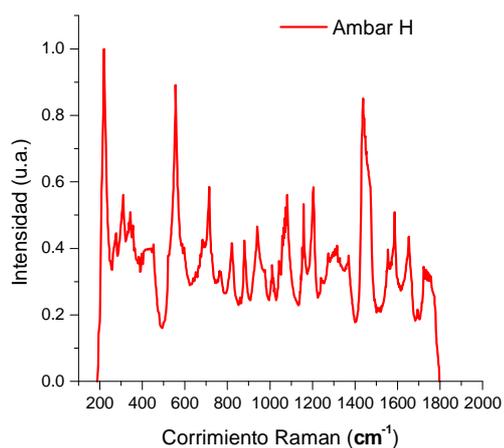
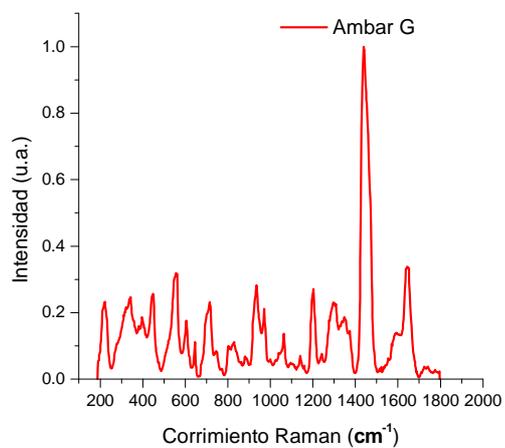
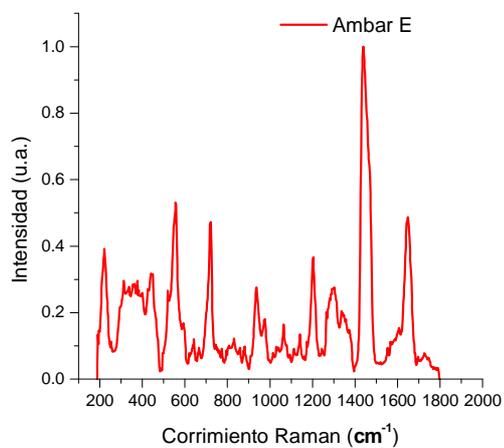
Anexo B

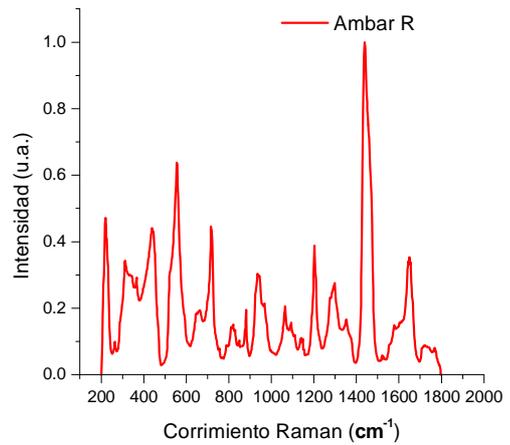
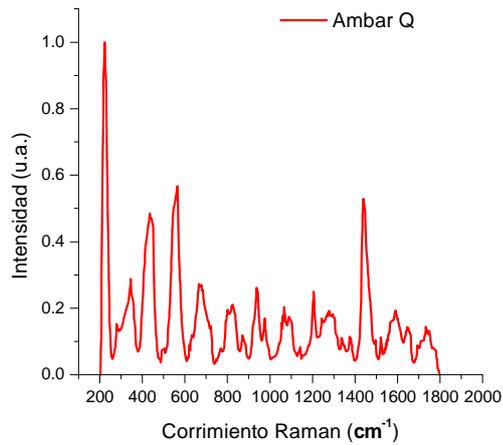
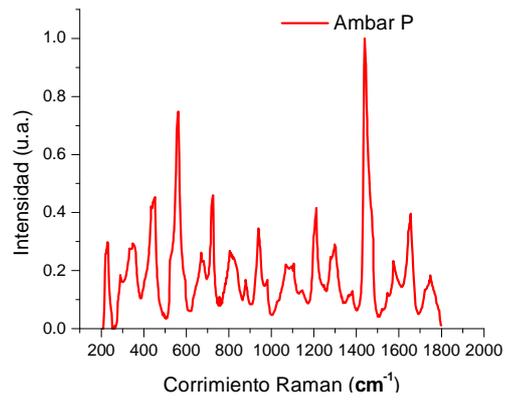
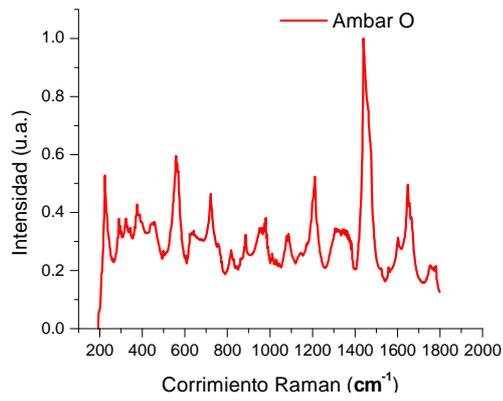
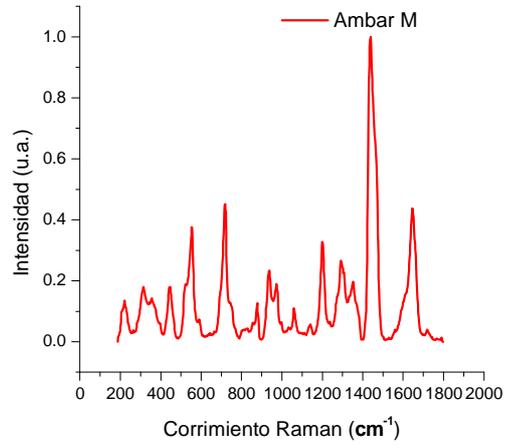
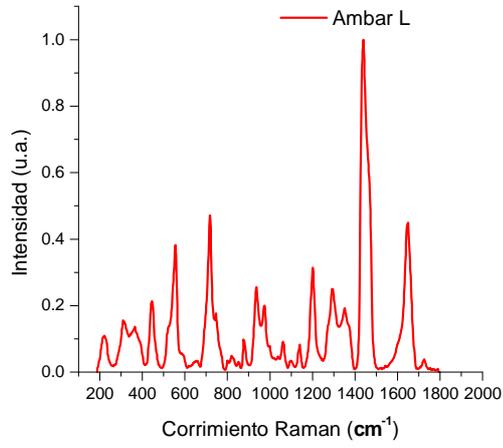
Espectros Raman del ámbar de Chiapas y del Báltico.

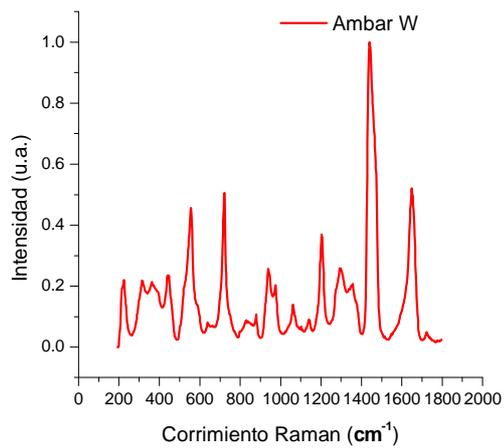
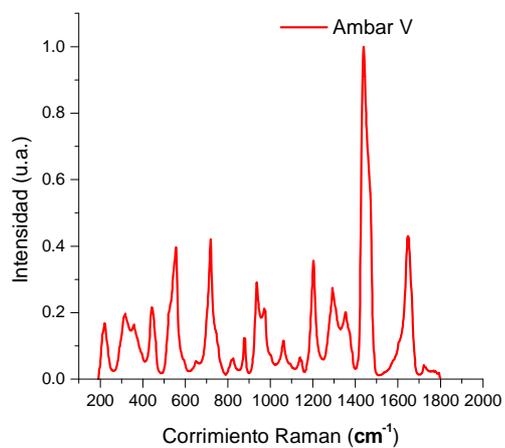
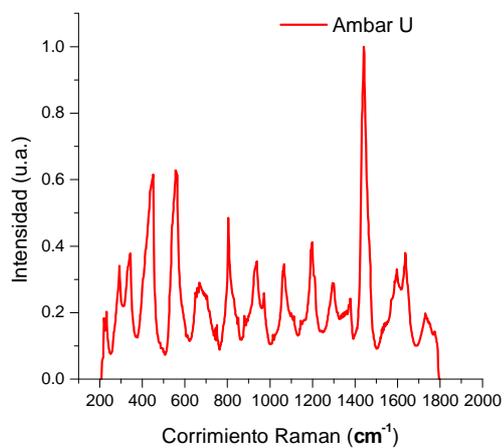
Ámbar de Chiapas

Región 200-1800 cm^{-1}

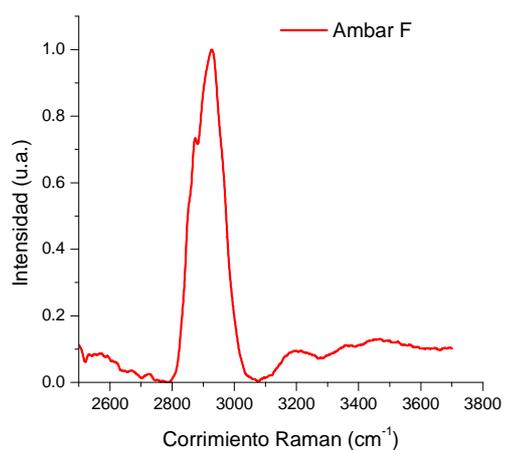
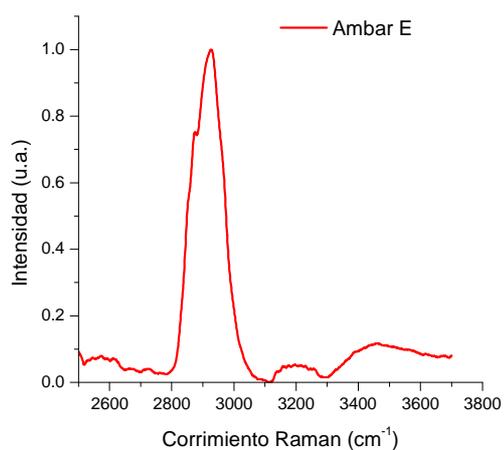
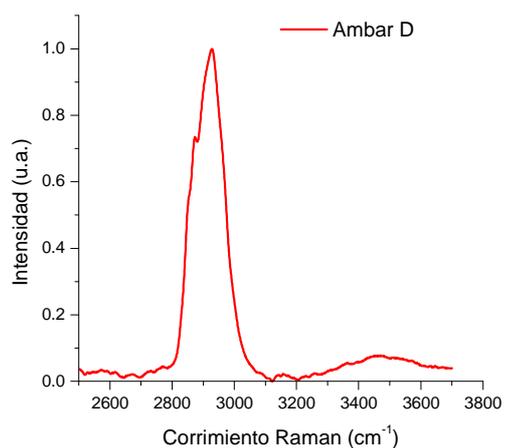
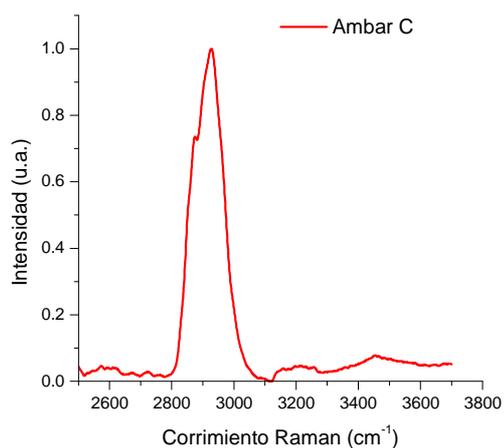
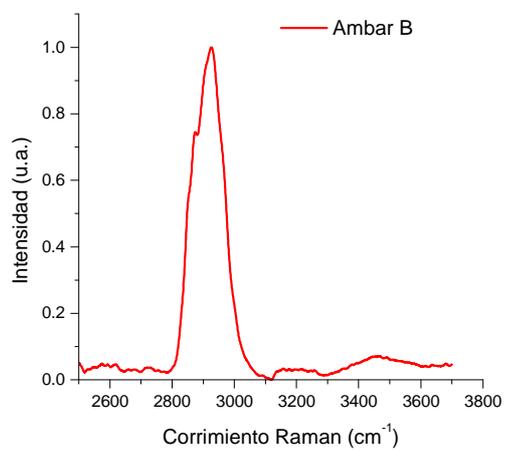
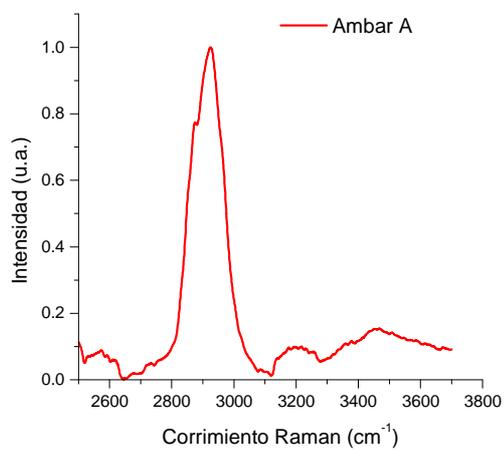


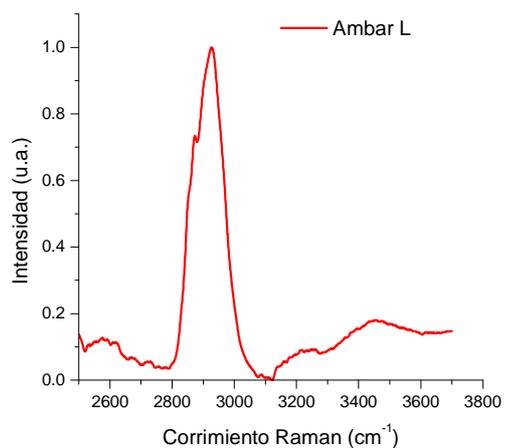
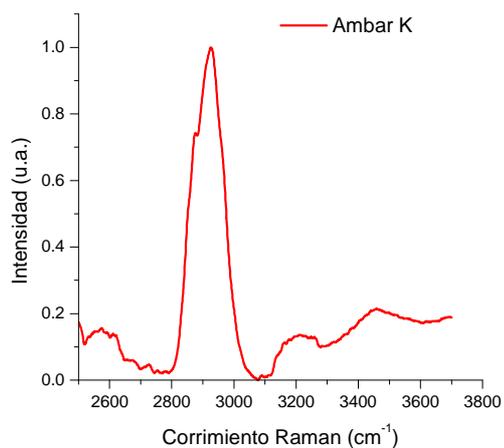
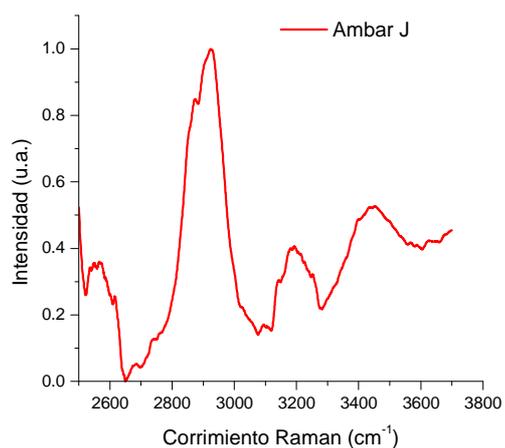
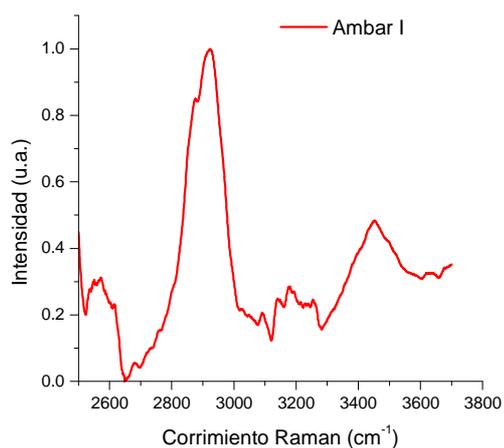
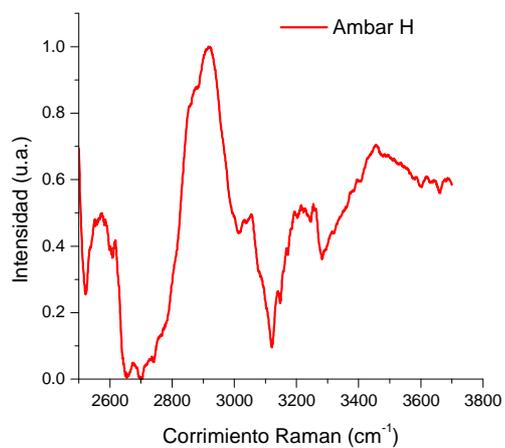
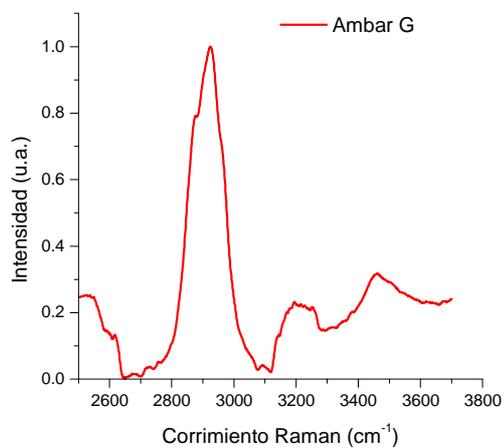


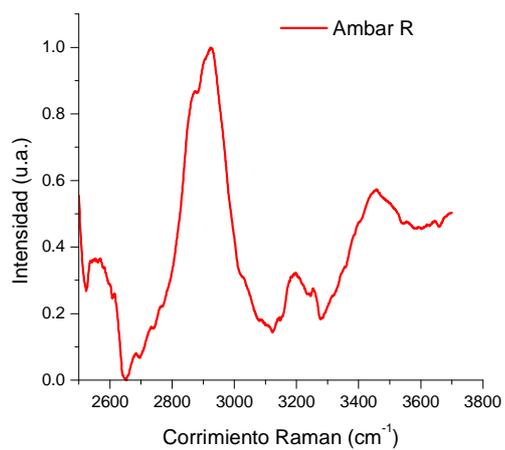
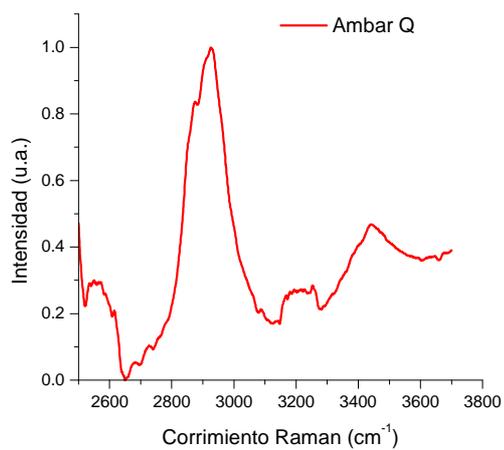
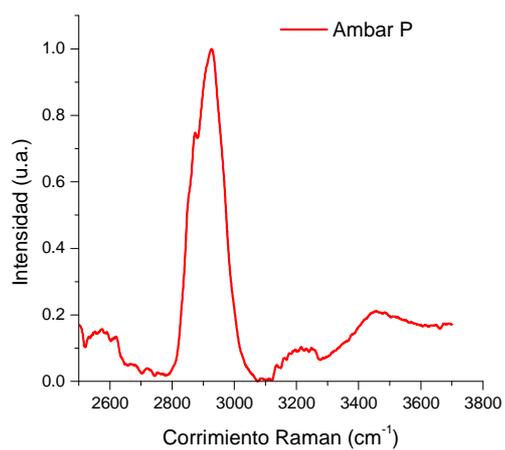
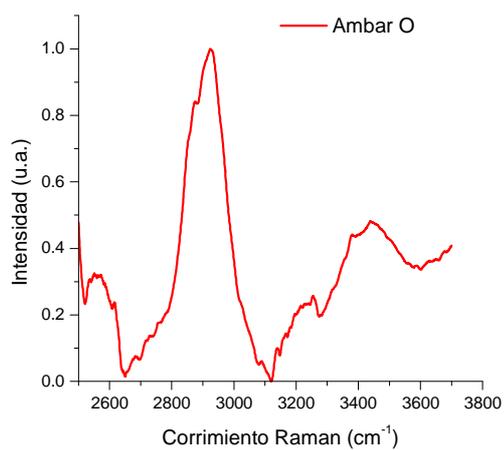
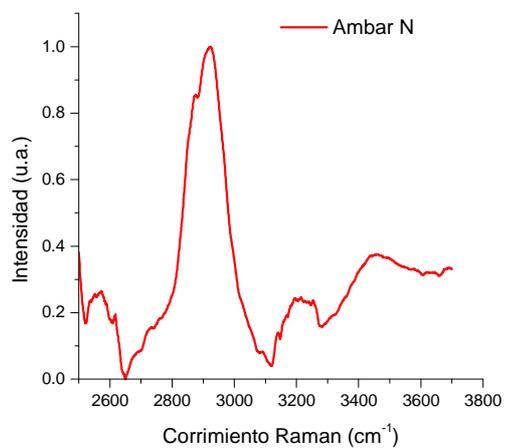
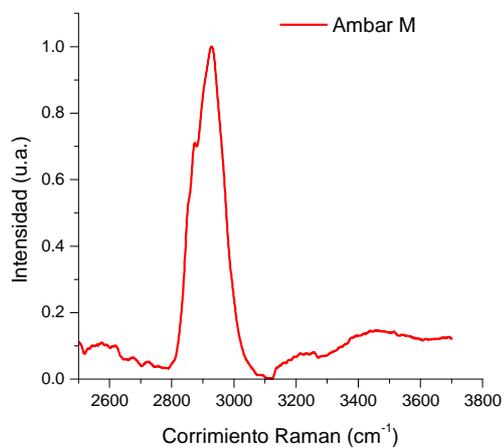


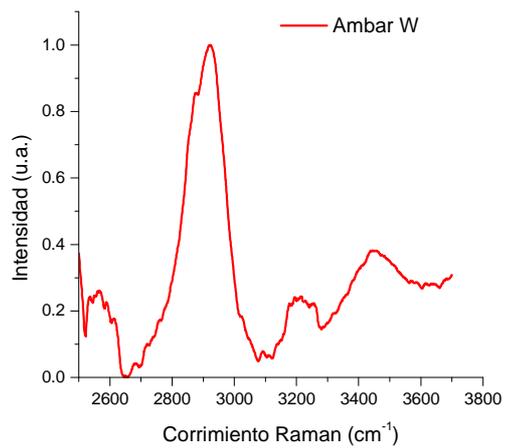
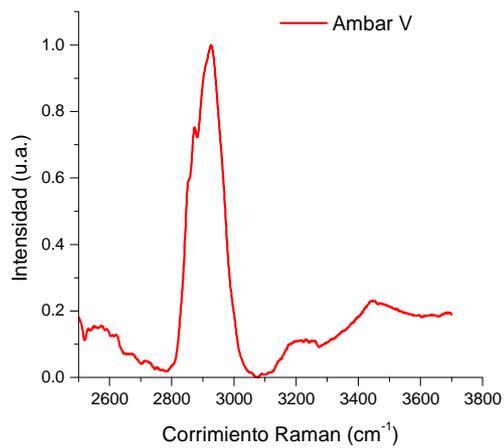
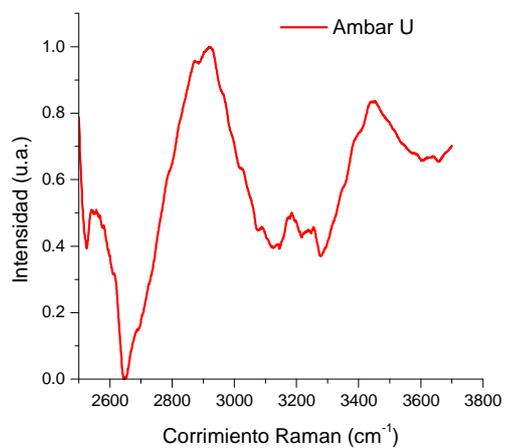
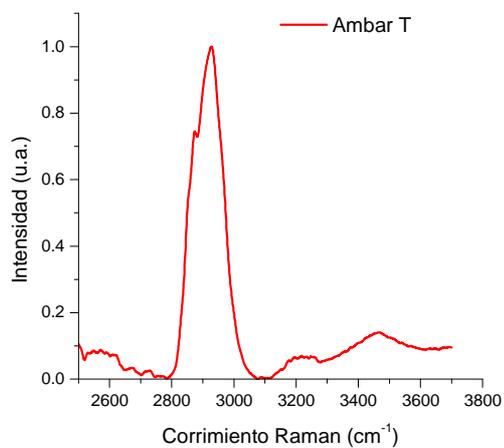


Región 2500-3700 cm^{-1}



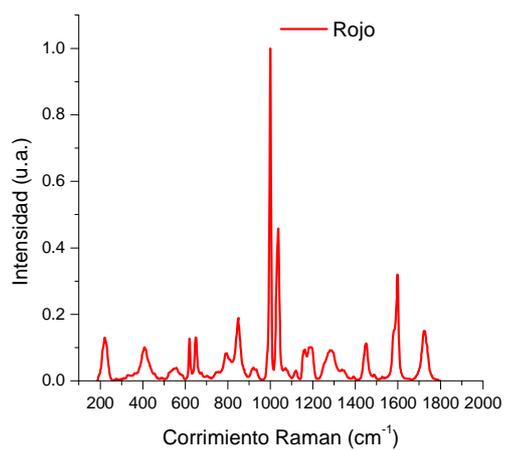
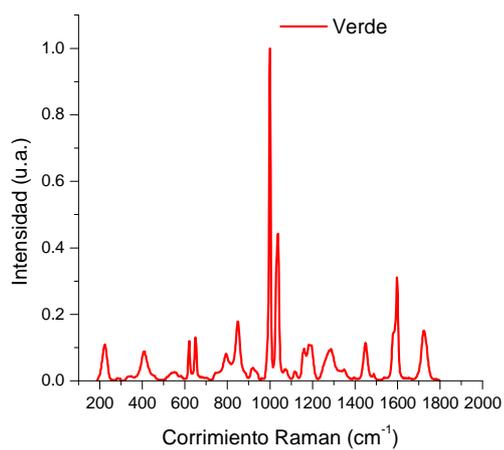
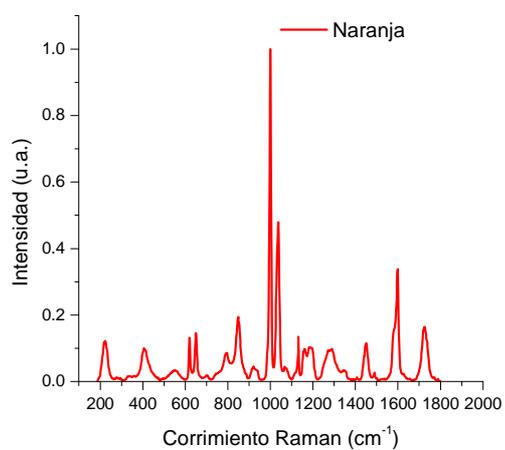
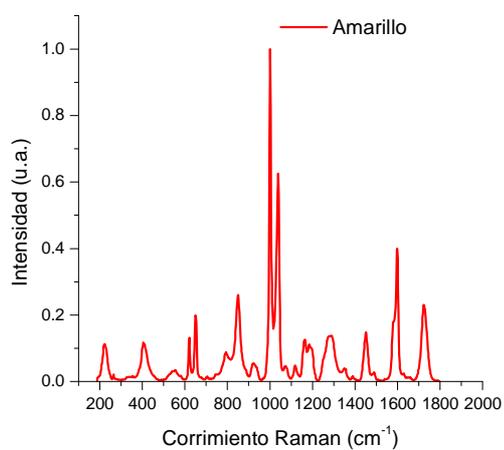




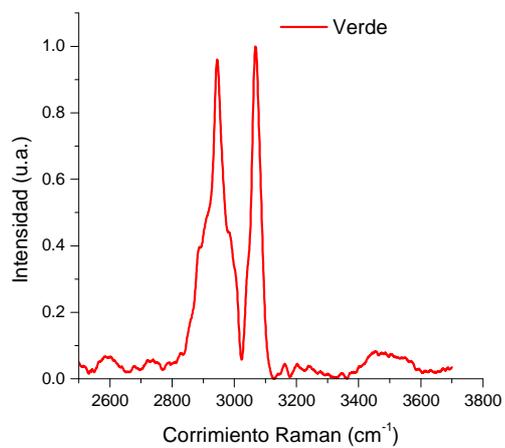
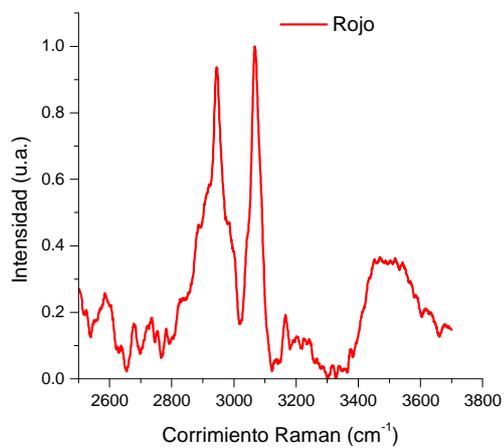
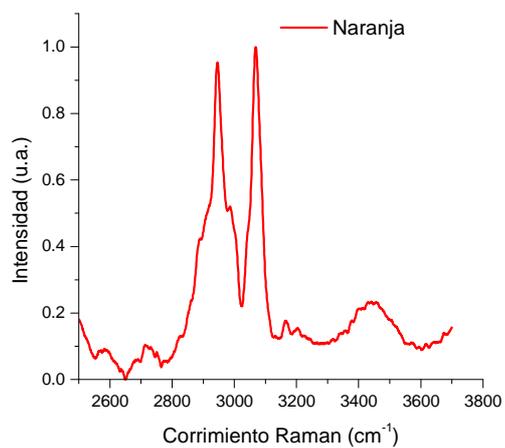
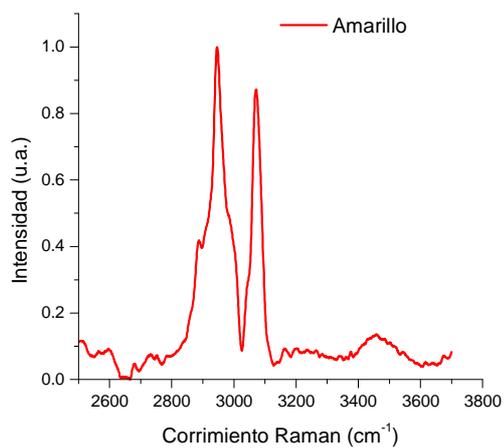


Ámbar del Báltico

Región 200-1800 cm^{-1}



Región 2500-3700 cm^{-1}



Anexo C

Visita a la mina Pocitos en la ciudad de Simojovel de Allende, Chiapas.

Ámbar de Chiapas.

El ámbar se formó de una resina vegetal residual proveniente de pinos y coníferas o plantas leguminosas que vivieron hace 30 millones de años. Esta resina, al igual que cualquier otra resina natural, actuaba como una defensa del árbol contra el ataque de insectos, hongos y aves. Brotaba y se escurría sobre la corteza cuando una rama se rompía; en ocasiones, al escurrir sobre los troncos y ramas cubrió a insectos, arácnidos y plantas pequeñas. Como resultado de un importante fenómeno natural, aquella resina endurecía al contacto con el aire. Posteriormente las lluvias arrastraban la resina endurecida hacia los lechos de ríos y el mar. Ahí, con la arcilla y arena en potentes capas de sedimento, se transformaba haciendo posible su fosilización, teniendo como resultado lo que conocemos hoy como “Ámbar”.

Origen.

El ámbar es la única piedra preciosa y semi-preciosa de origen vegetal. Pertenece al grupo de las gemas orgánicas como: azabache, perlas, corales, entre otras. Se formó de una resina vegetal residual de algunos árboles que datan de hace 25 a 40 millones de años y que con el tiempo sufrió un proceso de fosilización formando masas irregulares y extensas dentro de los estratos de arenisca y pizarras arcillosas de la edad terciaria [27].

En Europa el ámbar se forma a partir de la resina del *Pinussuccinifera*, en tanto que en América proviene de una leguminosa (*Hymenaea Courbaril*) conocida en Chiapas (México) como *Guapinol* y en Nicaragua y República Dominicana como algarrobo, del período geológico terciario.

El primer lugar que se tiene registrado como fuente original del ámbar es la región del Mar Báltico. La pieza de ámbar más antigua trabajada por el hombre data de hace 30 mil años y se encontró en Hannover, Alemania. En Europa se localizan en: Lituania, Polonia, Alemania, Latvia, Rusia. En América Latina se localizan en los países de: México, República Dominicana, Nicaragua.

Variedad de colores.

De acuerdo a su color y grado de transparencia se clasifica en once tipos con la misma calidad, como sigue [28]:

Tipo 1	Ámbar claro, casi transparente
Tipo 2	Ámbar amarillo verdoso translúcido
Tipo 3	Ámbar amarillo claro rojizo transparente
Tipo 4	Ámbar rojo claro transparente
Tipo 5	Ámbar rojo rubí translúcido
Tipo 6	Ámbar rojo oscuro que luce casi negro
Tipo 7	Ámbar tono pardo translúcido
Tipo 8	Ámbar tono pardo muy claro translúcido
Tipo 9	Ámbar café
Tipo 10	Ámbar lechoso
Tipo 11	Ámbar verde

El color más común es el amarillo y menos frecuentes son el verde, blanco, rojo y azul.

Ámbar en México

En México, el ámbar se localiza en los municipios chiapanecos de Simojovel de Allende, Huitiupán, Totolapa, El Bosque, Pueblo Nuevo Solistahuacán, Pantelhó y San Andrés Durazanal [29].

El ámbar localizado en la zona de Simojovel proviene de la época Terciaria, el cual se comprobó que tiene una antigüedad de 25 millones de años.

Aunque existen otros países en donde se ha encontrado ámbar, el de mejor calidad es el de México y República Dominicana. El de Chiapas, es el ámbar de mayor dureza en el mundo (de 2.5 a 3.0 en la escala de Mohs), cualidad que le da un alto prestigio internacional como material para la talla y la escultura.

Con fecha del 15 de Noviembre del 2000, se publica en el Diario Oficial de la Federación la declaración general de protección de la denominación de origen "ÁMBAR DE CHIAPAS".

En la tabla C.1 se presenta las especificaciones del Ámbar de Chiapas [28].

Tabla C.1 Especificaciones fisicoquímicas del Ámbar de Chiapas.

PARÁMETROS	RESULTADOS
Termogravimétrico (TGA)	Inicia a descomponerse a 218°C, máx. 397°C. Descomposición total a 479°C
Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)	Descomposición a 270°C
Infrarrojo (IR)	Espectro característico del ámbar
Relación succínita/retinita, succínico/retinol	0.19 ácido succínico/retinol
Gravedad Específica	1.08 g/cm ³ a 23°C
Análisis Dieléctrico (DEA)	$\epsilon = 4.675$
Conductividad eléctrica	Conductividad=1.744x10 ohm/cm, material aislante
Comportamiento con la luz ultravioleta	Cambio de color con luz UV de onda corta "azul blanquecina." Sin cambio con luz UV de onda larga
Fluorescencia	Azul, a) una longitud de onda = 463 nm
Color	Pantone 100c -120c Amarillos Pantone Yellow U Amarillos Pantone 114 U Amarillos Pantone 471 tonos rojizos Pantone 481 tonos rojizos
Transparencia	% Transmitancia = 95,7%
Índice de refracción	n = 1,552
Dureza	Microdurómetro, 30.48 g/mm
Conductividad térmica	K= 0.002131 cal /s.cm°C
Coefficiente de dilatación térmico lineal	a = 57,98 u/m/°C (entre 20°Cy 110°C)

Producción.

Extracción.

Las minas de ámbar se encuentran en sitios de muy difícil acceso debido a procesos erosionales, por lo que están expuestas a peligrosos derrumbes, ya que se localizan en sitios de pendientes muy pronunciadas. Son más de 500 minas de ámbar distribuidas en 10 ejidos pertenecientes a tres municipios: El Bosque, Simojovel y Amatán [29].

En la figura C.1 se observa el camino hacia una de las minas de Simojovel, llamado Pocitos, así como la entrada a dicha mina.



Fig. C.1 Camino hacia la mina Pocitos en la ciudad de Simojovel de Allende, Chiapas.

El descubrimiento de yacimientos de ámbar empieza con la localización de capas de carbón de piedra en la ladera de la montaña. A partir de ello, comienza la excavación de un túnel. Una vez descubierta la pared compacta, se empieza a excavar utilizando machetes y palos con puntas de metal para hacer túneles horizontales. El desecho se arroja hacia fuera de la mina.



Fig. C.2 Veta de ámbar.

En la figura C.2 se muestra una veta típica del ámbar. Por su parte, la figura C.3 muestra la estructura interna de la mina de Los Pocitos. La altura de los túneles varía entre uno y dos metros, según sea la orientación de la veta. El túnel se va haciendo más largo conforme se penetra al interior del cerro. Muchas veces el minero trabaja en cuclillas, hincado o acostado. Al no tener apuntalamientos, los túneles resultan muy

peligrosos pues el terreno es poco compacto, por lo que resulta ser muy frágil. Los mineros trabajan sin protección alguna y los derrumbes provocan grandes tragedias, como se muestra en la figura C.4, en la cual quedaron sepultadas herramientas de los mineros.



Fig. C.3 Estructura interna de la mina Los Pocitos.



Fig. C.4 Derrumbe de una mina.

El hallazgo de una pieza de ámbar puede tardar días de labor. En ocasiones se encuentran unos pocos gramos, entre cascajo y conchas fósiles. El ámbar rojo principalmente hace presencia al principio de las excavaciones.

Actualmente existe un promedio de 600 mineros, fundamentalmente hombres, que se dedican a la extracción del ámbar en forma temporal, combinando esta actividad con el cultivo de maíz, café y frijol. Para ingresar a la mina y extraer ese material, los hombres no necesitan más que un foco sujetado a su cabeza o gorra, cincel, martillo o marro, carreta y ropa cómoda, como se observa en la figura C.5. No hay horario de entrada ni de salida ni jefes inmediatos ni mucho menos respaldo laboral; para explotar esas minas se acordó con los habitantes de esos poblados dicha extracción y para llegar a ellas, los caminos son cortos, empinados, lodosos (en tiempo de lluvia), montuoso, de difícil acceso, vulnerables a derrumbes.



Fig. C.5 Extracción de ámbar.



Fig. C.6 Pieza de ámbar incrustado en la pared de la mina.

Adultos y adolescentes dedican no más de cuatro horas al oficio, no ofrecen más tiempo porque la labor es agotadora, hay que salir cada tres horas de esos túneles, debido al calor interior y la baja presencia de oxígeno, mientras se cincela para encontrar la resina. La labor sigue siendo igual como hace décadas, sólo que ahora han sustituido las velas por los focos de mano. La figura C.6 muestra una pieza extraída de la pared interna de la mina visitada.

Una parte de las mujeres de esta área natural, después de realizar sus actividades del hogar, y sus niños, una vez cumplidas sus actividades escolares, se dedican a buscar piezas de los escombros que son expulsados de los socavones por los mineros, o a trabajar directamente en las minas por breves periodos para extraer la pieza y comercializarla directamente con los artesanos o comercializadores de la localidad.

Lijado y Pulido.

Los mineros ofrecen directamente el ámbar en bruto a los talleres de los artesanos, el cual se vende según el peso de la pieza. Los artesanos seleccionan las piezas por tamaño y posteriormente, a efecto de retirar la tierra y material ajeno adherido a la resina, las sumergen en agua y proceden a limpiarlas, para después seleccionarlas según la calidad, la cual depende de las fracturas que tengan, mayor calidad significa menos fracturas internas. El precio del ámbar se establece según su calidad, color, tamaño y fisuras, entre otras características. En la figura C.7 se muestran piezas de ámbar sin pulir.



Fig. C.7 Pieza de ámbar sin pulir.

Posteriormente, las piezas se lijan con lija de agua calibre 80 o 100, como se muestra en la figura C.8. Esto con la finalidad de quitarle impurezas pequeñas, para continuar con el proceso de corte en diferentes tamaños dependiendo de la figura que se pretenda realizar.



Fig. C.8 Lijado de una pieza de ámbar. **Fig. C.9** Pulido de una pieza de ámbar.

Cuando se han clasificado dichas piezas, se les da forma utilizando limas planas o curvas según sea necesario, una vez concluida la figura, se procede a lijar realizándolo con lija de agua utilizando los calibres del 320, 400 o 600 dependiendo la forma de la figura. Posteriormente, se pule utilizando franela, pasta para pulir plata, y petróleo. En la figura C.9, se encuentra un artesano puliendo una pieza, en el motor se observa pedazos de franelas.

En la figura C.10, la primera imagen corresponde a una pieza de ámbar lijado y en la segunda se muestra la pieza después de haber sido pulida.



Fig. C.10 Ámbar lijado y pulido, respectivamente.

Tallado

Esta actividad requiere de años de experiencia, innovación y creatividad del artesano, últimamente alentada por la participación en certámenes y exposiciones locales, nacionales e internacionales [30]. Para tal labor se requiere ámbar en bruto y la figura o escultura dependerá del tamaño de la pieza y la creatividad del escultor. Así, pueden

obtenerse diversas figuras como aves, instrumentos musicales (marimbas, guitarras, baterías), lagartos, cabezas mayas, entre otras.

El proceso de tallado para esculturas, sigue algunas de las etapas de pulido que se usan en lapidaria, con variantes que cada escultor perfecciona. Por ejemplo, cuando aún tiene cascajo o roca o concha, pone a remojar la pieza en agua o ácido para no desgastarla y aprovecharla al máximo, según la finalidad a alcanzar; también se utiliza puntas filosas de navajas y lija para las impurezas. Cuando está limpia, el artesano sabe si es posible trabajarla en el diseño propuesto o si debe dárselo otro uso.

Las puntas en forma de fresas son utilizadas para empezar a darle forma. Algunos emplean limas diseñadas por los propios artesanos, especialmente en sus puntas, para facilitar los detalles.

Los primeros escultores usaban puntas de navajas. Las diferentes puntas empleadas son elaboradas especialmente en Chiapa de Corzo, donde utilizan muelles de automóviles, porque son de acero muy consistente. Los rayones son borrados con el tipo de lijas de agua ya mencionadas y agregan la No. 1000, que es más efectiva para este propósito (genera el pulido más fino). Otros accesorios para este pulido son las "llantas de manta" y diferentes tablas con punta o corcho y brasso (marca comercial de una cera muy popular en nuestro país), frotando los detalles hasta dejar la pieza brillante.

Asimismo, el proceso de tallado del Ámbar de Chiapas puede ser manual, de tipo artesanal e industrial, también es importante conocer las características de las inclusiones del ámbar pudiendo con ello decidir los cortes que se habrán de hacer para aprovechar al máximo las piezas, además de reconocer el color, sus tonalidades y el peso para decidir su cotización, el método de tallado se verifica visualmente.

El Ámbar debe presentar sus características en el tallado, facetado y engarzado en diferentes materiales, ya sea en oro, plata o algún otro metal, clasificar la calidad que le corresponde basándose en el color dentro de los términos, fino, muy bueno, bueno y ordinario pueden darse también en la forma de talla de cada artesano y en los diseños de los joyeros, tomando en cuenta el color de las piezas del ámbar y su tamaño.

Anexo D

Presentación de resultados en Congresos.

Participación y exposición del póster “Caracterización óptica del Ámbar de Chiapas”, de Guadalupe López Morales y Rafael Espinosa Luna. IX Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia, llevado a cabo en la ciudad de León, Guanajuato, México (16-18 de mayo de 2012).

“Optical Characterization of Pure Bismuth thin Films”, R. Espinosa-Luna, Enrique Camus, Dagoberto Cardona, G. López-Morales, I. Saucedo-Orozco, E. de la Rosa, E. Castro-Camus, R. Carriles, B. S. Mendoza. XXI International Materials Research Congress, realizado en Cancún, México (12 - 17 de agosto de 2012).

“Aplicación de la Espectroscopia Raman para la Caracterización del Ámbar de Chiapas”, G. López Morales, C. Frausto Reyes, R. Espinosa Luna. Trabajo aceptado para el LV Congreso Nacional de Física, que se celebrará en Morelia, Michoacán, del 8 al 12 de octubre de 2012.

Entrevista radiofónica acerca del Ámbar de Chiapas para la radio del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C. (CIBNOR) por el Dr. Rafael Espinosa Luna (02 de julio de 2012). <http://www.cibnor.gob.mx/es/dedc-dpto-de-extension/radio-conacyt>

Publicación de artículo de divulgación para la revista Noticio No.27 y la revista No. 60 de Gaceta CyT México con el tema “El ámbar de Chiapas”.
http://www.gacetacyt.org//index.php?option=com_content&task=view&id=2333&Itemid=67

Bibliografía.

1. Villanueva-García Manuel, Martínez-Richa Antonio, Robles Juvencio, Assignment of vibrational spectra of labdatriene derivatives and ambers: a combined experimental and density functional theoretical study, *ARKIVOC* (VI) 449-458 (2005).
2. Manuel A. Iturralde-Vennet 2001. Geology of the Amber-Bearing Deposits of the Greater Antilles, *Caribbean Journal of Science* **37** (3), 141-167 (2001).
3. Rachel H. Brody, Howell G.M. Edwards, A. Mark Pollardb, A study of amber and copal samples using FT-Raman spectroscopy, *Spectrochimica Acta Part A* **57**, 1325–1338 (2001).
4. W. Winkler, E. Ch. Kirchner, A. Asenbaum, M. Musso, A Raman spectroscopic approach to the maturation process of fossil resins, *J. Raman Spectrosc.* **32**, 59–63 (2001).
5. Eugene Hecht, *Optics*, Addison-Wesley, New York, 1987.
6. Grant R. Fowles, *Introduction to Modern Optics*, Reinhart & Winston, New York, 1989.
7. M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics*, Cambridge University Press, New York, 2005.
8. Hiroyuki Fujiwara, *Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications*, John Wiley & Sons, Tokyo, 2007.
9. D. Goldstein, *Polarized Light*, Marcel Dekker, New York, 2003.
10. C. Brosseau, *Fundamentals of Polarized Light: A Statistical Optics Approach*, Wiley, New York, 1998.

11. J. J. Gil, and P.M. Aranl, El modelo de la esfera de Poincaré: representación de medios materiales, *Zubía. I.E.R.* **9**, 9–17 (1991).
12. S.Y. Lu, R.A. Chipman, Mueller matrices and the degree of polarization, *Opt. Commun.* **146** (1998) 11–14.
13. R. Espinosa-Luna, S. Hinojosa-Ruíz Y G. Atondo-Rubio, Manejo e interpretación polarimétrica de las matrices de Mueller, *Rev. Mex. Fis.* **55**(3) (2009) 0201.
14. J.J. Gil, E. Bernabeu, A depolarization criterion in Mueller matrices, *Opt. Acta* **32** 259–261 (1985).
15. R. Espinosa-Luna, G. Atondo-Rubio, E. Bernabeu, S. Hinojosa-Ruíz, Dealing depolarization of light in Mueller matrices with scalar metrics, *Optik* **121**, 1058-1068 (2010).
16. R.M.A. Azzam, N.M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light*, North-Holland, Amsterdam, 1989.
17. J. Ferraro y K. Nakamoto, *Introductory Raman Spectroscopy*, Academic Press, San Diego, California, (1994).
18. Schrader Bernhard, *Infrared and Raman Spectroscopy*, D-69451 Weinheim (Federal Republic of Germany), (1995).
19. Lakowicz J. R., Kluwer, *Principles of Fluorescence Spectroscopy*, Academic/Plenum Publishers, segunda edición, (1999).
20. J. De Gelder, K. De Gussem, P. Vandenabeele, L. Moens, Reference database of Raman spectra of biological molecule,. *J. Raman Spectrosc.* **38**, 1133–1147 (2007).
21. J. Jehlicka, S. E. Jorge Villar, H. G. M. Edwards, Fourier transform Raman spectra of Czech and Moravian fossil resins from freshwater sediments, *J. Raman Spectrosc.* **35**, 761–767 (2004).

22. H. G.M.Edwards, D.W.Farwell, S.E. Jorge Villar, Raman microspectroscopic studies of amber resins with insect inclusions. *Spectrochimica Acta Part A* 68 (2007) 1089-1095.
23. Ragazzi Eugenio, Roghi Guido, Giaretta Aurelio, GianollaPiero, Classification of amber based on thermal analysis. *Thermochimica Acta* 404 (2003) 43–54.
24. Ricky S. C. Woo, Yanghai Chen, Honggang Zhu, Jing Li, Jang-Kyo Kim, Christopher K. Y., Environmental degradation of Epoxy-Organoclay nanocomposites due to UV exposure: Part I Photodegradation. *Composites Science and Technology*, Volume 67, Issues 15–16, December 2007, Pages 3448–3456.
25. Barbara Muik, Bernhard Lendl, Antonio Molina-Díaz, Maria José Ayora-Cañada, Direct monitoring of lipid oxidation in edible oils by Fourier Transform Raman spectroscopy. *Chemistry and Physics of Lipids* 134 (2005) 173–182.
26. Robert F.Coughlin, *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*. Prentice Hall, 5 ed., México, 2007.
27. Museo de Ámbar de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
28. Norma Oficial Mexicana NOM-152-SCFI-2003.
29. Museo Comunitario del Ámbar. Simojovel de Allende, Chiapas.
30. Casa de las Artesanías de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.