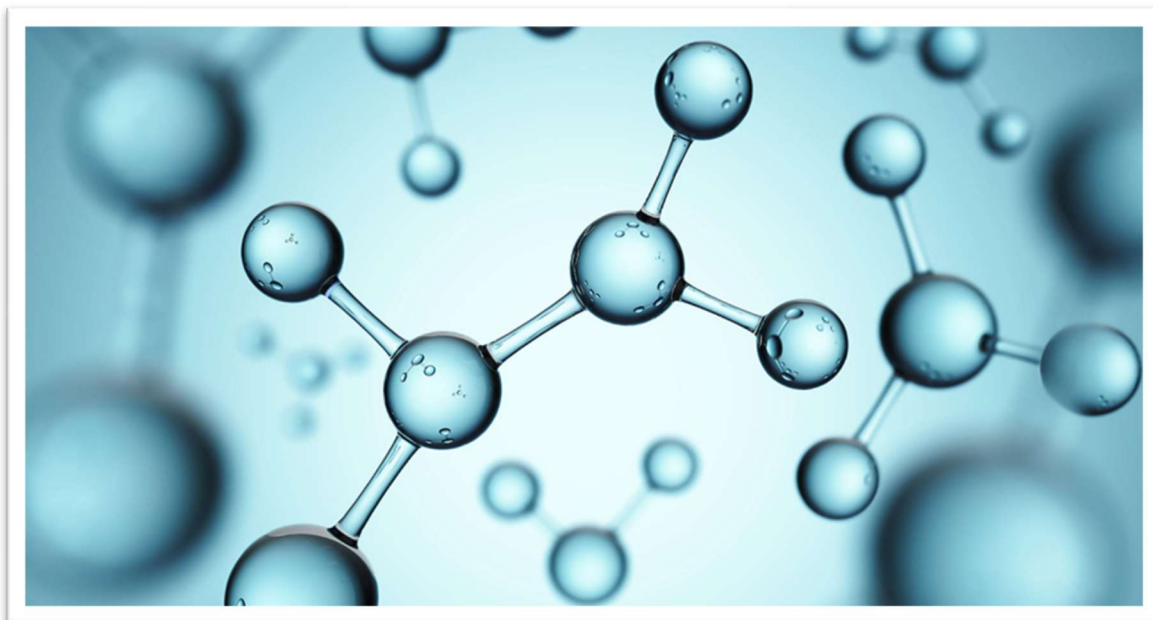


ESPECTROSCOPIA: LA HUELLA ESPECTRAL DE LÍQUIDOS



AUTORA: Daniela Kohley Aguilar

TUTOR: Gregorio Rosa Palacios

Agradecimientos

Un proyecto como este requiere mucho esfuerzo y dedicación, además del cansancio mental que conlleva. Por ello me gustaría dar las gracias a todos aquellos que me han ayudado a seguir en pie y llevar este trabajo adelante.

Al IES Arquitecto Ventura Rodríguez por darme la oportunidad de realizar este trabajo.

A Gregorio Rosa, mi tutor, por su constante motivación y dedicación, sin las cuales este proyecto no sería el mismo. También a mi primera tutora, Paz Rosado, quien me contagió su pasión por la física.

A mis amigos por su apoyo y consejos, sin ellos no hubiese sido capaz de confiar en mis habilidades.

A mi padre, por ayudarme en todo aquello que podía y por ser mi constante referencia.

A mi madre, por soportar mis continuas quejas y darme ánimos cuando más los necesitaba.

ABSTRACT

Spectroscopy is a branch of science that studies the interaction of light with matter. It uses instruments such as the spectrometer to determine the molecular structure of every possible substance. A spectrometer generates spectra from the received light, which is conditioned by the atoms or molecules that interacted with it, and therefore reveals absorption or emission lines in specific wavelengths.

This study describes the way of obtaining the absorption spectra of certain liquids using a DIY spectrometer, which has been equipped with an entrance slit, a diffraction grating, as well as a camera to capture the spectrum. An LED lightbulb is used as light source shining through the analyzed liquids, and additionally a fluorescent lamp and a laser for spectral calibration purposes. The spectra are then uploaded to an Open-source system called Theremino, which creates a graphical representation of the spectra. Each graphic is analyzed with a system-design platform called LabView, which compares the obtained spectra with a reference, to determine the estimated percentage of absorption of each wavelength in the substances.

Índice

1	INTRODUCCIÓN.....	2
2	MARCO TEÓRICO	3
2.1	QUE ES LA LUZ	3
2.2	FOTONES	3
2.3	ESPECTROSCOPIA	4
2.4	ESPECTRÓMETRO	5
2.5	RED DE DIFRACCIÓN	5
2.6	FUNCIONAMIENTO DE UN ESPECTRÓMETRO.....	7
2.7	OBJETIVO	8
3	MARCO PRÁCTICO	8
3.1	DISEÑO DEL EXPERIMENTO	8
3.1.1	<i>CONSTRUCCIÓN DEL ESPECTRÓGRAFO.....</i>	<i>9</i>
3.1.2	<i>PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL ESPECTRÓGRAFO.....</i>	<i>12</i>
3.1.3	<i>SELECCIÓN DE LÍQUIDOS A ANALIZAR</i>	<i>14</i>
3.2	EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO	14
3.2.1	<i>CALIBRACIÓN DE LOS ESPECTROS.....</i>	<i>15</i>
3.2.2	<i>RESULTADOS CON FILTROS DE COLORES.....</i>	<i>17</i>
3.2.3	<i>RESULTADOS DE LOS ESPECTROS DE LÍQUIDOS.....</i>	<i>19</i>
4	CONCLUSIONES.....	21

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

La posibilidad de la existencia de vida fuera de nuestra área de confort, a la que llamamos Tierra, ha culminado las mentes de un gran número de personas, desde estudiantes de colegio, con apenas conocimientos suficientes, hasta los científicos más prestigiosos. Sin embargo, el significado de vida en otros planetas podría tener un aspecto diferente al de la Tierra.

Se considera a un organismo no inerte como “un sistema autosuficiente capaz de evolucionar según el modelo de Darwin”, pero esto aún no explica la gran complejidad que presenta descubrir vida en nuestro Universo.

La combinación de los elementos químicos del nitrógeno, oxígeno, carbono e hidrógeno hacen posible la existencia de vida en nuestro planeta. No obstante, esto suscita preguntas en científicos, quienes afirman la posibilidad de vida con elementos químicos diferentes. En la actualidad, existen numerosas localizaciones que podrían albergar vida, empezando por Marte y acabando con los exoplanetas (planetas que orbitan alrededor de otras estrellas diferentes al Sol). El Rover Curiosity, lanzado el 26 de noviembre de 2011, confirmó la existencia de un espacio habitable en el planeta rojo hace millones de años. Desde entonces, se han mejorado los métodos de detección de organismos, siendo el Rover Perseverance la prueba, destinado a buscar señales de vida antigua y recolectar muestras de roca y regolito para su posible regreso a la Tierra.

Estos dos Rovers albergan la clave para el descubrimiento de vida en Marte: el espectrómetro. Este instrumento se apoya en la espectroscopía, basada en la interacción entre el electromagnetismo y la materia. Siendo esta mi motivación, a continuación, se explican los distintos fundamentos de la física en los que se ha basado este proyecto.

1.2 ESTADO DEL ARTE

Se considera a Isaac Newton como el fundador de este estudio, al ser el primero en trabajarlo sistemáticamente. A comienzos del siglo XIX, Joseph von Fraunhofer, considerado uno de los fundadores de la óptica moderna, descubrió las llamadas “Líneas de Fraunhofer”, que permitió determinar las líneas de absorción en el espectro del Sol (luz blanca), debido a la absorción por oxígeno e hidrógeno en la atmósfera.

A partir de entonces, la espectroscopía se convirtió en el método principal para la identificación de sustancias, empleado en química, para determinar la estructura de distintos compuestos, en medicina, para facilitar el diagnóstico, al igual que en otros estudios relacionados, como la física, biología o astronomía.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 QUE ES LA LUZ

La luz es un tipo de onda electromagnética que el ojo humano es capaz de percibir. En la actualidad, es aceptada la teoría que afirma que la luz presenta una naturaleza dual, es decir, que se propaga como partículas o como onda.

Cuando hablamos de onda visible, nos referimos a aquella parte del espectro que comprende en el rango entre 450 y 750 nanómetros y que engloba a los colores, encontrándose en los extremos el color violeta, con una onda de menor longitud y el rojo con una de mayor. Sin embargo, el concepto de la luz en forma de partículas presenta un aspecto más complejo, debido a que se basa en unas partículas elementales específicas, denominadas fotones.

2.2 FOTONES

La frecuencia de una onda es directamente proporcional al nivel de energía de un fotón, siendo la fórmula fundamental: ($\Delta E = h * f$; $\Delta E = h * \frac{c}{\lambda}$) por lo que cuanto más amplia sea la longitud de una onda, menor será su energía y viceversa. Esta frecuencia multiplicada por su longitud de onda corresponde a la velocidad de la luz. La energía solo puede transferirse por medio de “paquetes” individuales o partículas del tamaño “ $h\nu$ ” (ver anexo A.1). Cada uno de estos paquetes individuales se denomina “cuanto” y es la unidad más pequeña en las que puede transferirse la energía. Cuando hablamos de luz, estas partículas reciben el nombre de fotones (cabe señalar que el término luz en este contexto, se refiere al espectro electromagnético en su conjunto).

Los átomos y moléculas pueden absorber y emitir fotones. Debido a que la energía está cuantizada, se transmite toda la energía del fotón, aunque el proceso contrario también podría producirse. Para que esto ocurra, el fotón deberá presentar un valor de energía específico. Si esto se cumple, el átomo absorberá la energía producida por el fotón y

subirá a un nivel atómico mayor inestable. Al volver a su estado inicial, emitirá un fotón de la misma energía, generando así la luz que percibimos. Este movimiento del electrón, de un nivel de energía menor a uno mayor o de regreso, recibe el nombre de transición.

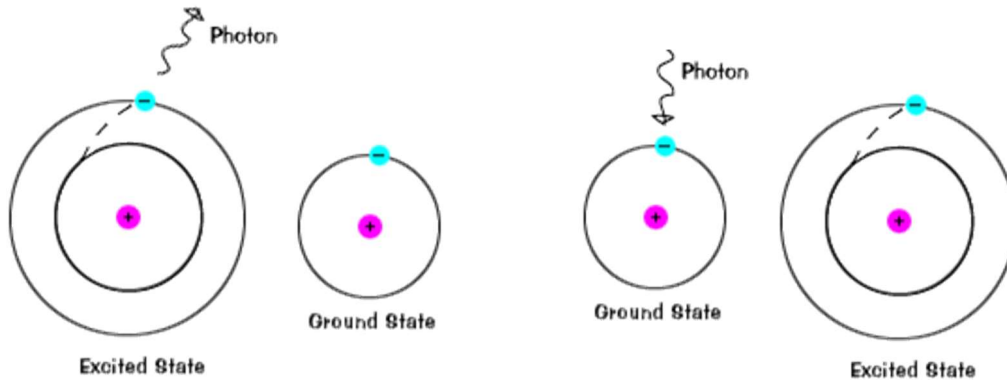


Ilustración 1: Esquema explicando los procesos de emisión (izquierda) y absorción (derecha) de fotones en la interacción con la materia. Imágenes obtenidas de la página oficial de la NASA.

2.3 ESPECTROSCOPIA

Es el estudio de las interacciones que ocurren entre la materia y las diferentes formas de radiación electromagnética. Existen distintos tipos de espectroscopía, dependiendo de qué sección del espectro electromagnético reaccione con determinados átomos o moléculas. Entre ellos se encuentra la espectroscopía infrarroja, ultravioleta, de Rayos X, etc. En todos estos casos se obtienen o espectros de emisión, que se definen como el conjunto de longitudes de onda que emite un átomo, o espectros de absorción, que se entienden como la representación gráfica de las longitudes de onda de la luz, mostrando en bandas negras aquellas frecuencias absorbidas por los electrones.

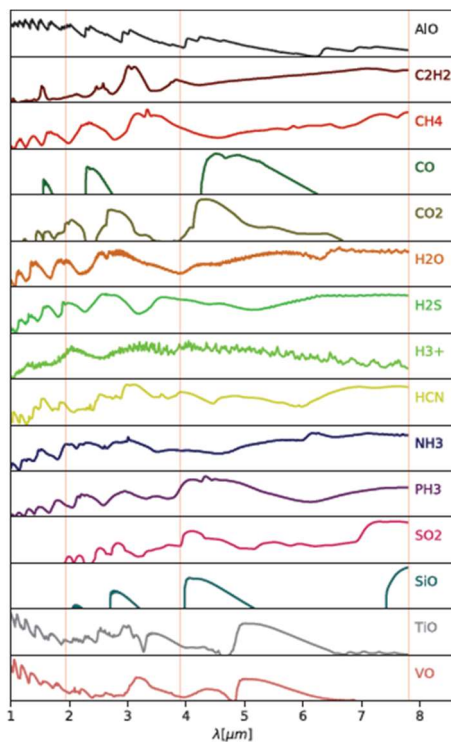


Ilustración 2: Espectros de absorción de diferentes moléculas en el infrarrojo (entre 1 y 8 μm de longitud de onda). Imagen obtenida de la página oficial de la ESA.

2.4 ESPECTRÓMETRO

Se trata de un instrumento de medición basado en la espectroscopía, que permite determinar la estructura molecular de la materia que nos rodea. Su nivel de complejidad depende de su uso, sin embargo, el proceso al que se somete es el mismo en todos los casos. Su objetivo es descomponer la luz en sus respectivas longitudes de onda mediante un prisma o una red de difracción.

Cada uno de los átomos o moléculas presentan la llamada “huella dactilar”, un espectro que muestra las líneas o bandas de emisión o absorción de distintos componentes, específicas para cada elemento, con diferentes intensidades en cada longitud de onda. En la Ilustración 2 se muestra espectros de absorción de una amplia sección de longitudes de onda en el infrarrojo, utilizados en la misión espacial Ariel de la Agencia Espacial Europea (ESA) para detectar la composición de elementos químicos de las atmósferas de exoplanetas mediante la espectroscopía [1].

2.5 RED DE DIFRACCIÓN

Se refiere a un componente óptico basado en el fenómeno de la difracción. Existen distintos tipos de redes de difracción apoyadas en la reflexión o la transmisión, sin embargo, el proceso es igual en todos los casos. La red de difracción por transmisión presenta el concepto más sencillo de entre todos y es el que se va a emplear en esta experimentación.

Este instrumento presenta una rejilla, compuesta por un gran número de líneas paralelas entre sí, con una separación similar a la longitud de onda del láser o luz blanca que se vaya a utilizar. El número de rendijas que existe por milímetro se define por la letra N, por lo que la distancia entre dos rendijas contiguas cualesquiera se entienden como $d = 1/N$ (mm^{-1}). Su objetivo, por lo tanto, es separar el haz de luz en las respectivas longitudes de onda del espectro.

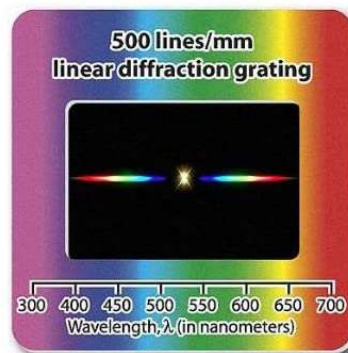


Ilustración 3: Imagen de una red de difracción de 500 líneas/mm, obtenida de la página oficial de Amazon.

La difracción es el término en el que se basa el principio de Huygens al atravesar luz por una rendija (cada nuevo frente de onda se convierte en un foco emisor). Este fenómeno da paso a la interferencia, relativa a la superposición de ondas. Existen dos tipos de interferencias, constructivas o destructivas. Para que el primer caso ocurra, la trayectoria de dos rayos deberá diferir en una longitud de onda (o cualquier longitud multiplicada por un número entero, $n \lambda$). Esta interferencia constructiva es la que genera los puntos luminosos (si se trata de luz monocromática) mostrados en la Ilustración 4, siendo el punto más luminoso el que se encuentra con una desviación de cero grados de la horizontal. La interferencia destructiva se crea cuando la trayectoria de dos rayos difiere media longitud de onda ($1/2 \lambda$, $3/2 \lambda$, $5/2 \lambda \dots$). Este tipo de interferencia genera las secciones oscuras del espectro.

Cada punto luminoso dará lugar a los órdenes mostrados en la imagen. La Ilustración 4 muestra cómo se obtienen los órdenes por medio de luz monocromática, es decir, con una única longitud de onda.

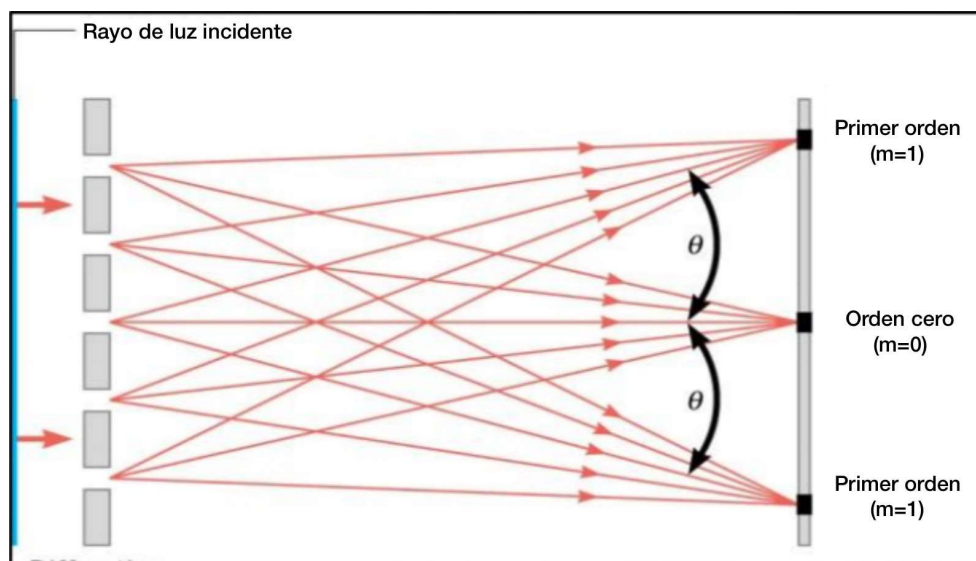


Ilustración 4: Esquema que explica el fenómeno de la difracción mediante una red de difracción (múltiples rendijas). En los órdenes (m), separados por el ángulo θ , se obtiene interferencia constructiva para una luz monocromática. Imagen obtenida de Socratic.

Cuando la diferencia en fase es nula, dará lugar al orden 0^{th} ($m=0$ en el diagrama). El primer orden ($m=1$) se consigue debido a la diferencia de fase de λ . El ángulo θ presentado en la Ilustración 4 depende de la longitud de onda (además del número de líneas/mm de la red de difracción).

Existe una fórmula general utilizada en espectrógrafos que presentan dos o más aberturas, que permite determinar el ángulo θ en cada ocasión:

$$d \sin \theta = m\lambda \quad [1]$$

Siendo d la distancia entre dos aperturas contiguas, θ el ángulo entre los órdenes, m los distintos números enteros de los órdenes y λ la longitud de onda correspondiente en cada uno de los casos.

2.6 FUNCIONAMIENTO DE UN ESPECTRÓMETRO

El espectrómetro separa la luz en sus respectivas longitudes de onda, bien por medio del fenómeno de la refracción, como ocurre con los prismas, o por el de difracción, característico de las redes de difracción, explicado anteriormente.

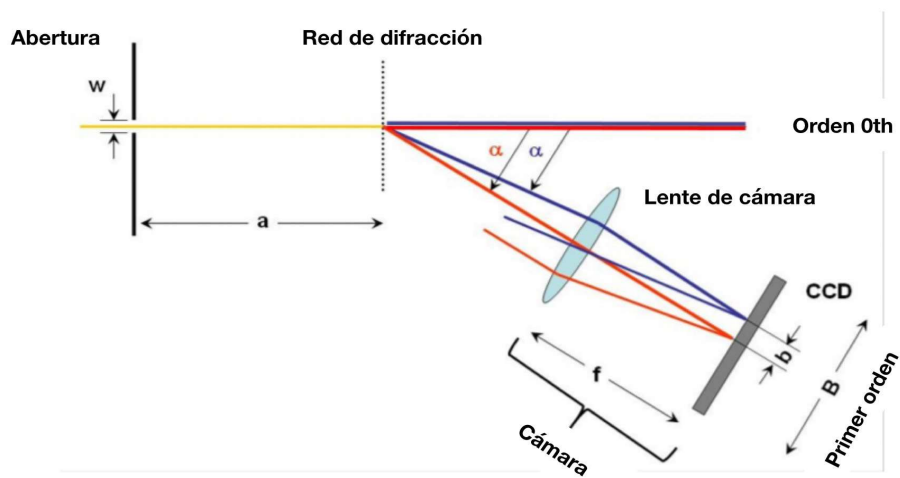


Ilustración 5: Esquema de un espectrógrafo con una rendija de entrada, una red de difracción y una cámara.

Los componentes fundamentales de un espectrógrafo son la rendija de entrada, que determina la entrada de una cantidad de luz determinada, y la red de difracción. Es posible la utilización de óptica para la iluminación uniforme de la red de difracción y de la cámara de detección. El orden cero del espectro se obtiene por la ausencia de ángulo. Este orden no separa las longitudes de onda, es decir, se mantiene el haz de luz principal (sección blanca) y por lo tanto todos los espectrógrafos se centran en el primer orden ($m=1$) dado que es la sección donde el espectro presenta más luminosidad y separa los colores en sus respectivas longitudes. Como se ve en la fórmula de la sección 2.5 el ángulo θ depende de la longitud de onda (λ) cuando el orden (m) es > 0 . El ángulo en el que se sitúa la cámara está determinado por la longitud de onda media del espectro que se quiere analizar. De este modo, la cámara recopilará el espectro de absorción de un líquido, que se podrá determinar gracias a su huella dactilar.

2.7 OBJETIVO

El objetivo de mi proyecto es determinar, mediante un espectrógrafo casero, los espectros de absorción de determinados líquidos y comprobar si es posible precisar la estructura molecular de estos.

3 MARCO PRÁCTICO

3.1 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

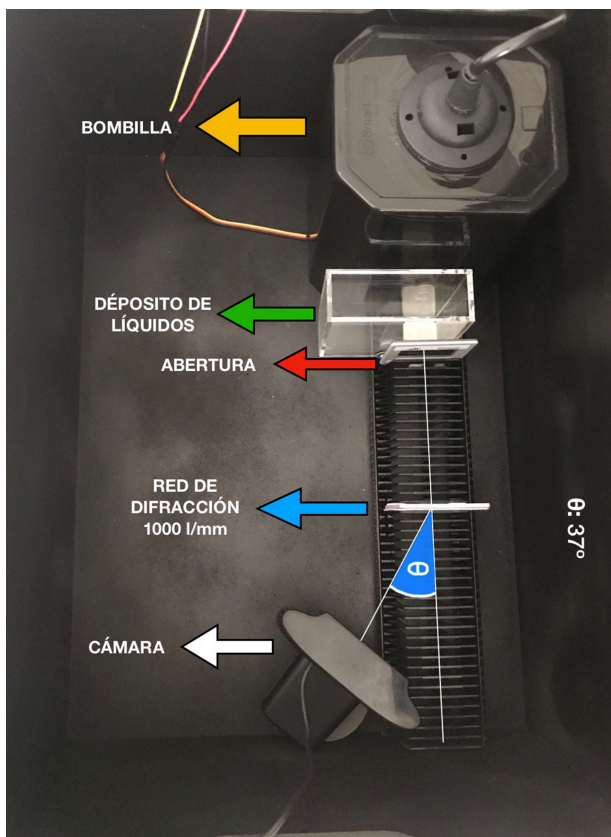


Ilustración 6: Diseño original del espectrógrafo utilizando como base el esquema presentado en la Ilustración 5.

En la parte experimental del proyecto se pretende determinar el espectro de absorción de determinados líquidos mediante la construcción de un espectrómetro.

El experimento se construye completamente en una caja opaca, incluyendo la fuente de luz y el depósito para analizar los líquidos mediante el espectrógrafo.

La caja presentará una serie de orificios, que permitan la salida de cables tanto USB para la conexión de la cámara, como para conectar la lámpara de luz blanca a una fuente de alimentación.

La lámpara se coloca primero, cubriéndola con un recipiente negro que

obstruya la salida de luz, a excepción de una abertura dirigida hacia la rendija de entrada. Entre la abertura y la rendija se sitúa un recipiente donde se echan las sustancias con las que se vaya a experimentar. A continuación, se encuentra la red de difracción, que dispersa la luz en sus respectivas longitudes de onda. El espectrómetro se concentra en el orden $m=1$. Sustituyendo los valores en la ecuación [1] se consiguen los ángulos específicos de esta experimentación. La cámara se coloca en un soporte, teniendo en cuenta el ángulo obtenido (este luego se corrige por cambiar la longitud de onda media)

y recoge el espectro (si se utiliza una red de 500 l/mm se trata de un ángulo de aproximadamente 17,5 grados, mientras que si se utiliza una de 1000 l/mm el ángulo es de 37 grados). Cabe destacar que la longitud de onda para estos ángulos es de 600nm, obtenida por la media entre los extremos del espectro visible (450nm el color violeta y 750 el rojo). Como se puede observar más adelante no ha sido posible obtener datos de longitudes de ondas fuera del intervalo de 380 a 680 nm debido al filtro infrarrojo que lleva incorporada la cámara web. Debido a esto, los ángulos obtenidos anteriormente utilizando la longitud de onda 600 nm no son viables, por lo que el ángulo en el que se ha colocado la cámara utilizando la red de difracción de 1000 l/mm es de 32° y la longitud de onda media empleada en el experimento es de 530 nm. Al conectar la cámara al programa “Theremino” se obtiene una imagen del espectro en directo, que forma al mismo tiempo una gráfica donde se reflejan sus máximos y mínimos emitidos.

Longitud de onda	600 nm	600nm	530 nm
Red de difracción	500 l/mm	1000 l/mm	100 l/mm
Ángulo obtenido	17, 5°	37°	32°

3.1.1 CONSTRUCCIÓN DEL ESPECTRÓGRAFO

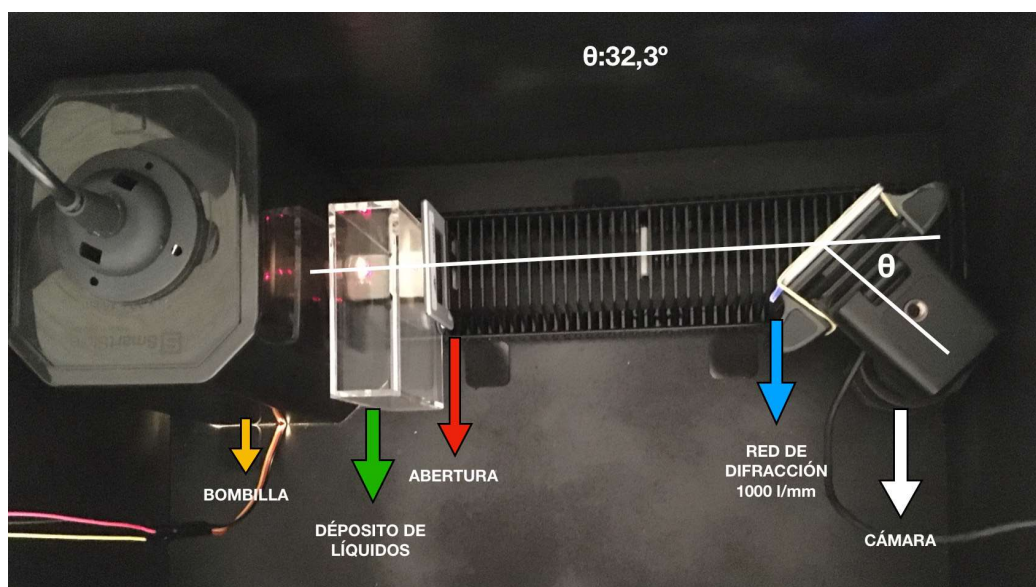


Ilustración 7: Diseño final del espectrógrafo. La red de difracción se encuentra directamente delante de la cámara en un ángulo de 32 grados con respecto al haz de luz. Este diseño es equivalente al descrito anteriormente, pero ofrece la ventaja de la obtención de un espectro más grande, lo que beneficia la calibración. Además, se trata de un diseño más compacto que permite su uso continuo.

El modelo del espectrógrafo con el que se han realizado las primeras pruebas generó un espectro demasiado corto sobre el campo de visión de la cámara, por lo que se ha tenido que recurrir a un diseño ligeramente distinto. En este nuevo modelo, la red de difracción ha sido colocada directamente delante de la cámara, estando ambos en el mismo ángulo anterior de 32° , facilitando la incidencia del rayo proveniente de la rendija. Esta modificación no cambia el trazado de rayos, simplemente ayuda en la calibración del espectro, al encontrarse más lejos de la red de difracción y generar un espectro más amplio. La construcción con este diseño, que puede ser observado en la Ilustración 7, se explica a continuación.

Para la construcción de un espectrógrafo simple, y del experimento en general, se han necesitado ciertos componentes específicos, ajustados a un modelo escolar, que permitan el entendimiento del funcionamiento de este instrumento, pero que, del mismo modo, presenten un presupuesto razonable para su finalidad en el proyecto (ver referencia [2]). Como fuente de luz se utilizarán dos tipos de bombillas diferentes, además de un láser, debido a la variación del espectro en cada una de ellas.

- **Bombilla LED blanca:** De todas las fuentes de luz de las que disponemos, es la que presenta un espectro más uniforme, por lo tanto, se utilizará para analizar los líquidos (ver párrafo 3.1.2.2 para más información sobre las fuentes de luz utilizados).
- **Bombilla Fluorescente:** Estas bombillas tienen un espectro amplio de fondo que genera luz blanca, además de líneas de emisión de mercurio, desempeñando por ello su función principal de calibración del espectro.
- **Láser rojo:** El láser rojo es una fuente monocromática, es decir, aparece como una única línea en el espectrógrafo, debido a que no posee un espectro característico. Por ello, es también idóneo para la calibración. Como es solo una línea, se podría utilizar como fuente adicional junto a la bombilla LED blanca durante el experimento, para tener una referencia de la longitud de onda.
- **Caja:** El material de la caja es madera porque se puede pintar fácilmente y permite un sencillo montaje de los componentes del experimento. Se han elegido esas dimensiones específicas, para acomodar una distancia suficiente entre la rendija y la red de difracción y poder montar en el mismo espacio la fuente de luz y el depósito para analizar los líquidos
- **Redes de difracción:** Se han comprado dos redes con diferentes resoluciones con el fin de determinar su eficacia en el proyecto. En un principio, se utilizará la red de

1000 l/mm debido a que ofrece una mayor resolución. Si la señal obtenida hubiese sido más débil, se habría utilizado la red de 500 l/mm.

- **Rendijas:** Se ha comprado un set de rendijas para evaluar la resolución e intensidad de los espectros con cada una de ellas. Inicialmente, se utilizará la rendija más pequeña de 0.1 milímetros de apertura, ya que ofrece un espectro más nítido.
- **Depósito de líquidos:** Se ha elegido este depósito ya que presenta una forma ideal para su montaje dentro del porta diapositivas. Se trata de un diseño rectangular que no deforma el haz de luz que pasa por el recipiente.
- **Porta diapositivas:** Tanto la red de difracción como las rendijas se ha comprado en formato de diapositivas por lo que se ha tenido que utilizar una porta diapositivas antigua que permita su fácil montaje.
- **Arduino uno:** Es una plataforma electrónica consistente en un microprocesador programable. Esta placa se necesita para el funcionamiento del láser. Este presenta una serie de conexiones específicas para su manejo con Arduino, que también permitirán subir un programa para encender o apagar el láser en el caso de que fuese necesario.
- **Cámara:** Para poder convertir la luz del espectro en una imagen digital para su visualización y posterior análisis se necesita de una cámara. Este modelo cumple adecuadamente las necesidades, presentando una alta resolución y campo de visión, además de poder ser enfocada.

Tabla 1: Material usado en la construcción del experimento

COMPONENTES	ESPECIFICACIONES
Bombilla LED blanca	OSRAM LED, 9W, 806 lumen, RGB y Blanco, regulable, 2700K
Bombilla fluorescente	PHILIPS Genie, 11W, 600 lumen, 2700K
Láser rojo	LASERFUCHS Dot Laser Rojo, 650nm 1mW, 5VDC
Caja	Caja de madera 40 x 30 x 23 cm, Pino
Red de difracción 1000 l/mm	Red de difracción en transmisión con un grabado de 1000 líneas/mm
Red de difracción 500 l/mm	Red de difracción en transmisión con un grabado de 500 líneas/mm
Rendija	3B Scientific U8470790, Set de rendijas de 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 y 1.6mm
Depósito de líquidos	3B Scientific Physik Lehrmittel - cubeta, rectangular, 80x30x80 mm ³

Porta diapositivas	Sin especificar
Arduino Uno	Para operar con el láser
Cámara	Logitech C920, resolución: 1920 x 1080 píxeles, campo de visión: 78°

3.1.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL ESPECTRÓGRAFO

3.1.2.1 Primeras pruebas con el diseño original



Ilustración 8: Imágenes obtenidas con el diseño original. A la izquierda se observa la red de difracción y la rendija de entrada, además del espectro producido por la bombilla fluorescente visto desde la cámara web. La imagen central presenta el espectro al cerrar la caja y a la derecha, la gráfica correspondiente del espectro obtenido a través del programa Theremino, siendo los números superiores las longitudes de onda sin calibrar.

Estas pruebas han sido realizadas con la bombilla fluorescente y con la red de difracción de 1000 líneas/mm. En la primera imagen (izquierda) de la Ilustración 8, se puede observar el espectro de emisión en la propia red de difracción, de acuerdo con el modelo original. Aun siendo el espectro corto, se pueden observar cada uno de sus colores, estando el violeta y el rojo en cada uno de los extremos. La tercera imagen representa la gráfica obtenida al analizar una fotografía de dicho espectro con el programa Theremino, siendo los máximos las longitudes de onda de mayor emisión de la bombilla. Debido al reducido tamaño del espectro obtenido en referencia a los píxeles de la cámara, se modificó el modelo del espectrógrafo, con el que se realizaron el resto de pruebas, además del análisis de líquidos. La mejora del espectro se puede ver en la [Ilustración 7](#).

3.1.2.2 Espectros de las diferentes fuentes de luz

Aunque para el ojo humano parecen emitir luz blanca, las fuentes de luz generan espectros de emisión muy distintos. Esto se debe a la forma en la que producen luz. Un ejemplo básico es el sol, que transforma el calor en luz excitando electrones con energía térmica (ver Ilustración 1). Las bombillas, en cambio, producen dicha excitación gracias a la energía eléctrica.

La selección de fuentes utilizadas en el experimento se puede ver en la Ilustración 6. Los espectros obtenidos con el espectrógrafo se han añadido en el anexo A.2.

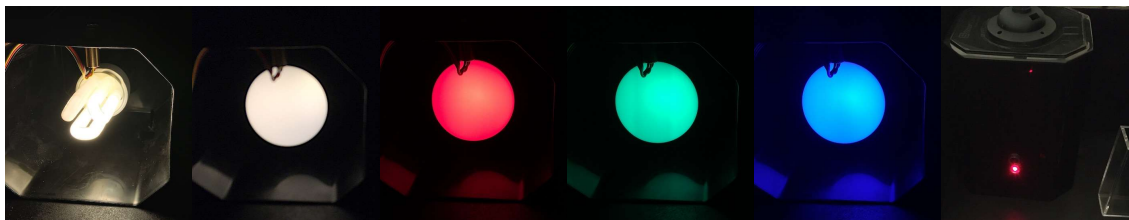


Ilustración 6: Fuentes de luz usadas en el experimento (de izquierda a derecha): Fluorescente, LED blanca, LED roja, LED verde, LED azul, Láser rojo.

LUZ FLUORESCENTE:

Estas bombillas excitan eléctricamente a un gas (mercurio) que se encuentran en su interior y los eleva a un nivel atómico mayor inestable. Al volver a su estado inicial, dichos electrones emitirán luz ultravioleta, que se convertirá en luz visible por medio del revestimiento de fósforo de la bombilla. Esta conversión de la absorción de luz de una energía más alta (ultravioleta) a la emisión de luz de una energía más baja (visible) por medio del fósforo se denomina fluorescencia, de ahí el nombre de esta luz. La mejora de la percepción de color blanco en la luz emitida se debe a su composición de diferentes fósforos. Es un espectro ancho en el que se encuentran líneas de emisión de mercurio restante.

LUCES LED DE COLORES:

Los LEDs (en inglés Light Emitting Diodes: diodos de emisión de luz) están basados en materiales semiconductores. Los semiconductores tienen dos bandas de energía y las transiciones entre estas bandas tienen como función la absorción de la luz y generación de corriente (como en los paneles solares) o, al contrario, pueden aplicar una corriente y generar luz (como en los LED). Este fenómeno se denomina electroluminiscencia. Sin embargo, no toda la energía proporcionada por la corriente eléctrica se convierte en luz, sino que parte de ella se transforma también en calor. La longitud de onda de la emisión de luz está determinada por la diferencia en energía entre las bandas que es distinta para cada semiconductor. Por eso, LEDs de diferentes colores utilizan materiales de semiconductores distintos. En comparación con el láser, las luces LED no pueden ser consideradas monocromáticas, ya que la luz emitida corresponde a un intervalo de longitud de onda.

LUZ LED BLANCA:

El intervalo de emisión de luz en un LED blanco es amplio y sigue el mismo mecanismo que las bombillas fluorescentes. Mediante un revestimiento de fósforo, se convierte parte de la luz de un LED ultravioleta o de un LED azul en luz amarilla. Dependiendo del fósforo empleado se consiguen luces blancas de distintas intensidades, como por ejemplo frías o cálidas. Estos tonos se pueden comparar con una fuente de emisión térmica como el sol o una bombilla incandescente (no vendidas en la actualidad). La temperatura de la fuente de emisión térmica equivalente se indica en las características del LED blanco (2700K en la Tabla 1).

LÁSER ROJO:

Este tipo de láser tiene una única longitud de onda, 650 nm, que coincide con el color rojo. Cada uno de los láseres son monocromáticos, por ello, generan una única línea en su representación gráfica, dependiendo de qué longitud de onda se esté utilizando. El láser también sirve como herramienta de calibración para el espectro.

3.1.3 SELECCIÓN DE LÍQUIDOS A ANALIZAR

Se han escogido distintos líquidos y mezclas de ellos para determinar sus espectros de absorción. Cada uno de ellos presenta un espectro único, que nos permitiría conocer las moléculas que los forman si se tratase del caso. Todos los líquidos son de fácil accesibilidad como el aceite de oliva, café, amoníaco, cerveza, ... Los resultados se encuentran en el Anexo.

3.2 EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO

Para el experimento se ha utilizado la bombilla fluorescente como fuente de iluminación junto al láser rojo, para poder comprobar la referencia de longitud de onda. La cámara web se encarga de capturar los espectros. Para el análisis de los espectros se ha utilizado el programa Theremino, y más adelante se han exportado en forma de tablas de texto (longitud de onda y luminosidad) a un programa escrito en LabView de National Instruments. Este programa permite obtener el porcentaje de absorción de los líquidos empleados.

Como referencia se han utilizado los espectros obtenidos con el depósito vacío (muy similar al obtenido sin depósito alguno, es decir, sin absorción) y se han comparado con

los obtenidos tras rellenar el depósito de un líquido u otro. Se ha utilizado la red de difracción de 1000 líneas/mm y la rendija de 0.1 mm. La influencia de las distintas redes de difracción y rendijas se demuestra en el anexo A.3.

3.2.1 CALIBRACIÓN DE LOS ESPECTROS

Este apartado se basa en cómo se ha conseguido la calibración de los espectros mediante la herramienta Theremino, basado en un sistema de códigos abierto. Cuando se sube un espectro determinado a esta herramienta, se muestra cómo los máximos no coinciden con sus longitudes de onda. Sin embargo, existe una pestaña en “herramientas” denominada “trim points” que permite determinar manualmente la longitud de onda de dos puntos del espectro. Para ello, se necesita de la tabla que se puede observar en el anexo A.2, que designa la longitud de onda correspondiente a cada máximo de las líneas de emisión de la bombilla fluorescente. De este modo, se obtiene una calibración en la cual la longitud de onda del espectro corresponde al píxel de la imagen sobre la cámara. El programa muestra de forma automática las longitudes de onda del resto de los picos del espectro. Si adicionalmente se utiliza el láser, su longitud de onda debe coincidir con lo especificado por el fabricante, aproximadamente 650 nm.

La explicación del proceso se encuentra en la [Ilustración 7](#). Se obtiene que la longitud de onda detectada del láser rojo después de la calibración es de 649 nm. Además, se obtiene la escala del espectro sobre la cámara. La ventana usada para el espectro es de 250 píxeles (Start 500 - End 250) y el rango de longitud de onda es de 320 nm (700nm - 380nm) resultando en una escala de unos 1.3 nm/píxel (320nm / 250 píxel).

Como el láser es monocromático, la extensión de su espectro sobre la cámara debe ser mínima. Con la anchura de su espectro a media altura del pico se puede determinar la resolución del espectro. La anchura medida es de unos 3.5 píxeles o 4.5 nm usando la escala especificada anteriormente. Esta resolución se debe a la óptica de la cámara y solo se podría mejorar empleando unas lentes adicionales. Para el experimento esto significa que líneas de absorción con anchuras por debajo de 4.5 nm no pueden ser detectadas.

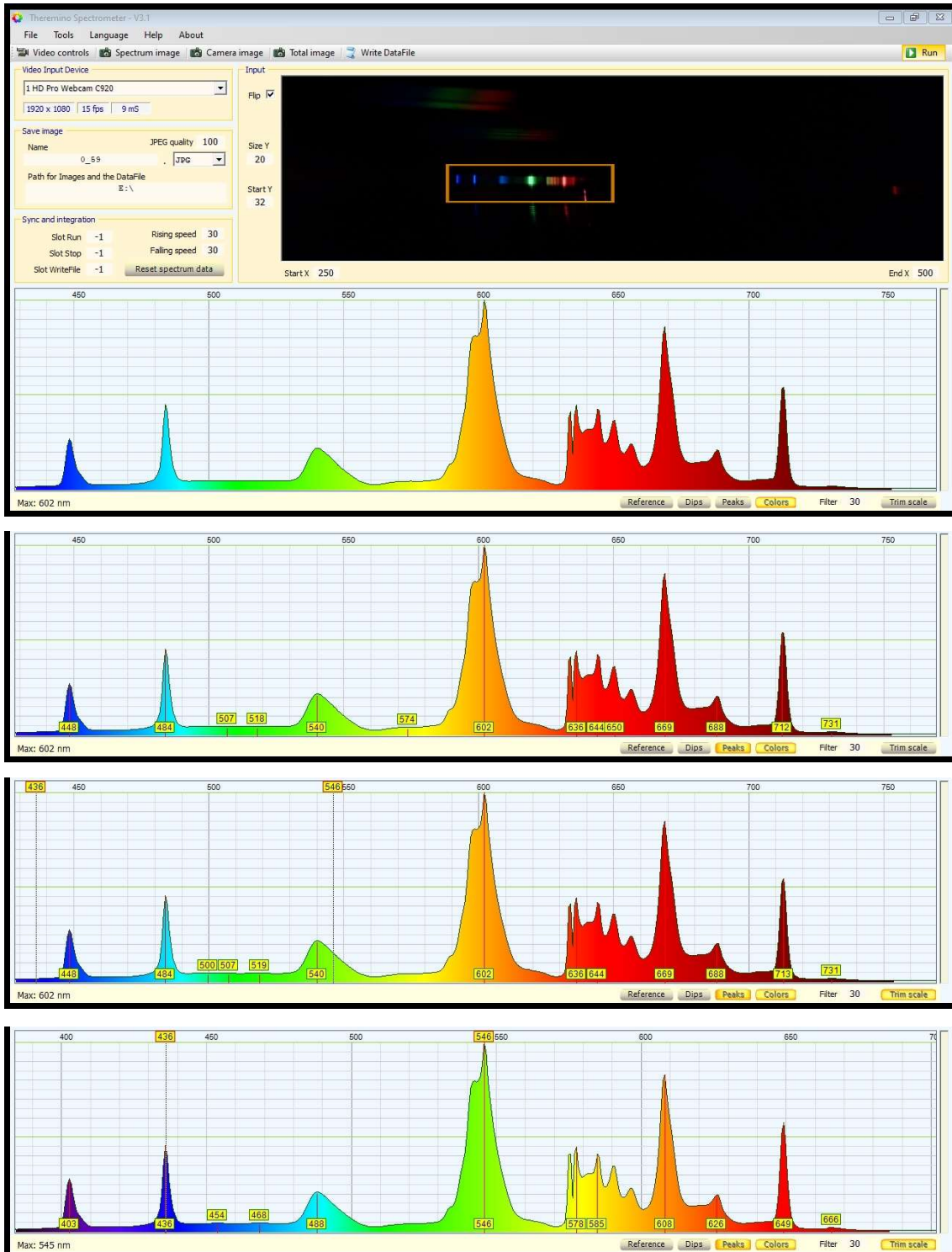


Ilustración 7: Proceso de calibración de las longitudes de onda con respecto a la posición del espectro sobre la cámara. En la primera fila, el espectro ocupa 250 píxeles de la cámara (desde píxel 250 (Start) hasta píxel 500 (End)). La escala de las longitudes de onda no está calibrada. En la segunda fila se activa la detección de picos de Theminio. En la tercera fila se eligen dos longitudes de onda pertenecientes a líneas de emisión de la bombilla fluorescente con las que se pretende calibrar en el espectro (436nm y 546nm) y en la última fila se mueven estas dos referencias sobre los picos del espectro a las que pertenecen estas líneas de emisión. Con esta calibración se puede comprobar también que el resto de los picos corresponden a las longitudes

de onda esperadas (ver anexo A.4). Se ve también que el láser que produce el pico en el rojo presenta una longitud de onda de 649 nm.

3.2.2 RESULTADOS CON FILTROS DE COLORES

Para ver el efecto de absorción de filtros de colores se ha cortado trozos de carcasas de CDs con plástico transparente y de color (ver Ilustración 8). La colocación de los filtros para este experimento y el espectro obtenido se ve en la Ilustración 9.

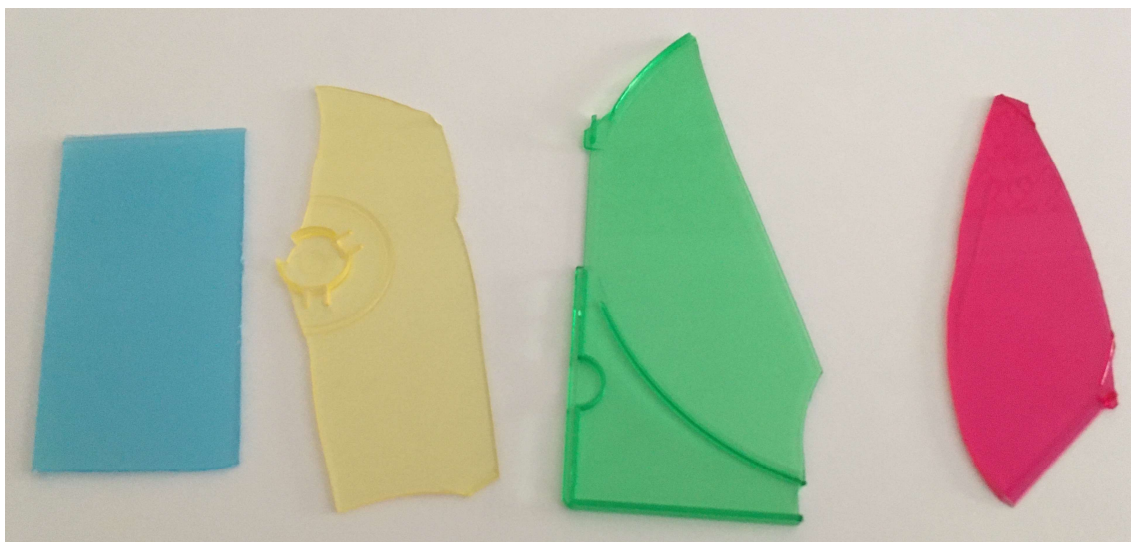


Ilustración 8: Filtros de colores hechas con trozos de carcasas de colores de CDs. De izquierda a derecha: azul, amarillo, verde y rojo.

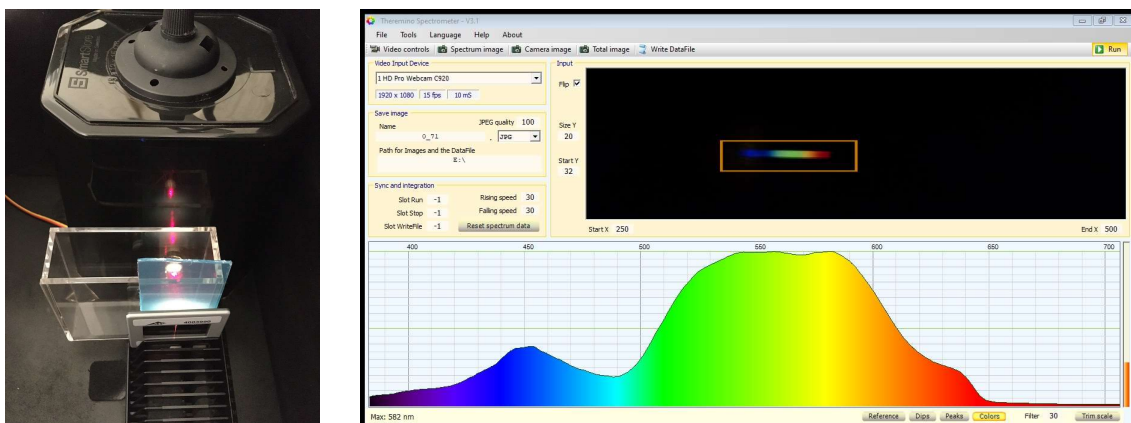


Ilustración 9: Colocación de los filtros (azul en este caso) y espectro obtenido.

Para esta prueba se ha utilizado la bombilla LED blanca y se han obtenido cuatro gráficas reflejando los espectros de absorción de los filtros azul, rojo, verde y amarillo. Analizándolos en la aplicación LabView utilizando como referencia la gráfica del espectro de emisión obtenido con el depósito vacío, se han podido normalizar los espectros. Esto consiste en escalar cada uno de los espectros para que nunca supere al

espectro de referencia (con valor 1) en ninguna longitud de onda (esto es visible en la curva de color verde de la Ilustración 12, que supera a la referencia en la región entre los 380 y 500 nm). La aplicación Theremino escala al 100% la máxima señal que encuentra en un espectro, por lo que es imposible obtener el valor real en porcentaje de lo que absorbe una sustancia. Lo único que se puede hacer es analizarlos con LabView y mediante un factor, estimar aproximadamente lo absorbido. En referencia a las imágenes inferiores, se puede observar que el filtro rojo, verde y amarillo no absorben nada entre 380 y 460 nm, ya que coinciden exactamente con la referencia. Sin embargo, el rojo absorbe mucho entre 480 y 580 aproximadamente. La absorción del amarillo y del azul es mínima.

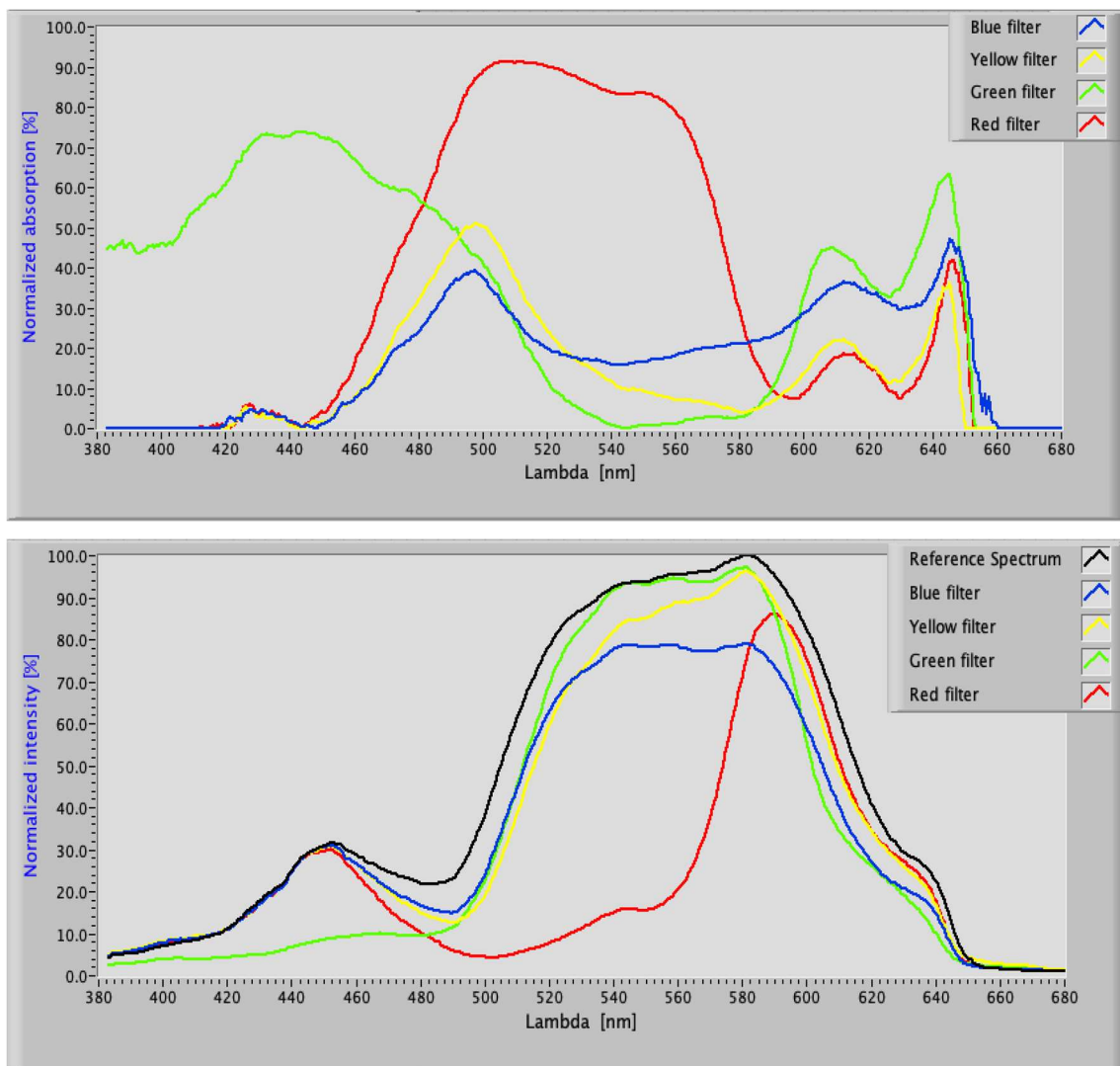


Ilustración 10: Arriba: todos los espectros obtenidos con los filtros de colores normalizados con referencia al espectro de referencia del depósito vacío. Abajo: pérdida de luz con respecto a la referencia.

3.2.3 RESULTADOS DE LOS ESPECTROS DE LÍQUIDOS

Se han realizado 14 muestras con el uso de una bombilla LED blanca. Muchos de los líquidos analizados muestran bandas de absorción que únicamente determinan el color del líquido. Una excepción es el aceite de oliva que muestra picos de absorción a lo largo del espectro debido a pigmentos clorofílicos y carotenoides. El resultado del espectro del aceite de oliva virgen extra en comparación con el aceite de girasol, además de una mezcla de ambos 50:50 se muestra en la Ilustración 12. La imagen del aceite de girasol y de aceite de oliva virgen extra junto con otros líquidos se encuentra en la Ilustración 11.

El resultado es similar a la literatura y muestra el correcto funcionamiento del espectrógrafo. El pico "a" en la ilustración corresponde con la clorofila b. En la Ilustración 15, se observa el espectro de referencia (agua de grifo) en color negro, mientras que el espectro normalizado de una pastilla nutricional disuelta en agua se representa con el azul. La imagen inferior muestra la resta de porcentajes entre los espectros anteriores, es decir, los porcentajes de absorción de cada longitud de onda de la sustancia (estos, igual que los presentes en la Ilustración 12 son aproximados). Las líneas corresponden a las longitudes que deberían haber formado picos en la gráfica según la literatura. Como se puede ver, no es exacto, ya que existen picos alrededor de 560 nm que no han sido capturados, sin embargo, líneas como las de 530 nm y 650 nm coinciden con la referencia utilizada.



Ilustración 11: Diferentes líquidos en el depósito. De izquierda a derecha: aceite de girasol, aceite de oliva virgen extra, cerveza y limpiador multiusos.

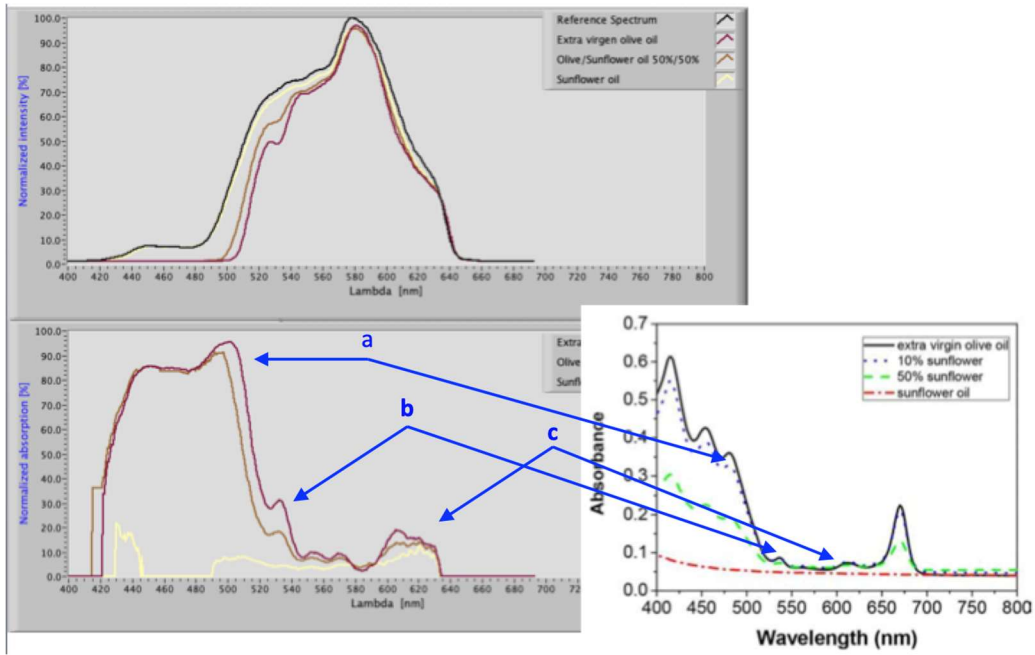


Ilustración 12: Espectros de aceites normalizados con respecto a la referencia (curva negra). La curva roja corresponde al aceite de oliva virgen extra, la mezcla mitad-mitad del aceite anterior con aceite de girasol se encuentra representada en color marrón y el aceite de girasol en color amarillo. Los picos de absorción obtenidos corresponden con la literatura (imagen de la derecha). Falta de las longitudes de onda por debajo de 475 nm (azul) y por encima de 650 nm (rojo).

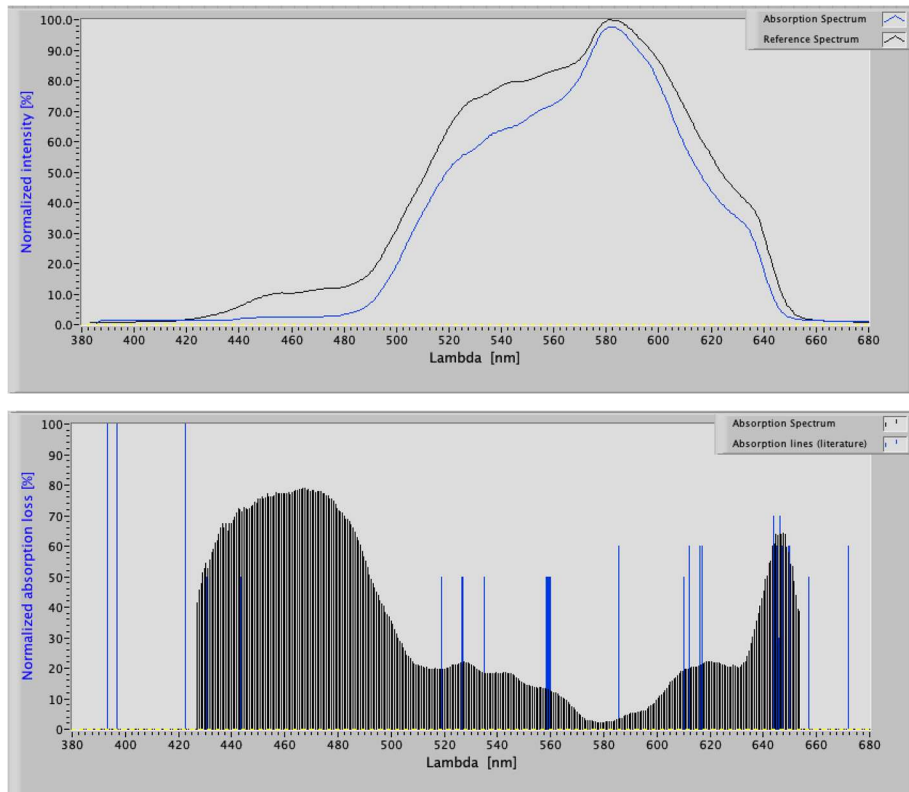


Ilustración 13: Espectro de una pastilla nutricional de calcio disuelta en agua en comparación con la referencia de agua de grifo (arriba). Los valores de absorción normalizados junto con la posición e intensidad relativa de líneas de absorción de calcio (abajo).

4 CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos, se puede concluir que se han completado los objetivos propuestos. Se ha conseguido analizar los espectros de absorción de determinados líquidos, sin embargo, no se ha podido determinar la estructura molecular de cada uno de ellos. El uso de un espectrómetro visible ha facilitado únicamente la posibilidad de observar los cambios en el color de los espectros, siendo la excepción los picos obtenidos por los pigmentos de clorofila del aceite de oliva. En cuanto a las líneas de mejora, la utilización de un espectrómetro infrarrojo ayudaría en la obtención de más líneas de absorción que solo reaccionan al infrarrojo. La mejora de la resolución se podría conseguir mediante el uso de lentes adicionales, que ayudaría en la detección de líneas más estrechas, en el caso de que las hubiera. También, la optimización del diseño facilitaría su uso educativo, que contribuiría a la enseñanza de los temas propuestos para segundo de Bachillerato de una forma más amena y entretenida. Las conclusiones del análisis de los espectros de absorción de los líquidos se encuentran en el Anexo.

Bibliografía

Bibliografía referida:

- [1] Ariel Definition Study Report: <https://sci.esa.int/web/ariel/-/ariel-definition-study-report-red-book>
- [2] Gatkin, Pradip, Zimmerman, Gregorio, Warner, & Eliza. (14 de septiembre de 2018). *A do-it-yourself spectrograph kit for educational outreach in optics and photonics*. Obtenido de SPIE.

Bibliografía de apoyo:

- [3] Benarque, F. J. (4 de diciembre de 2019). Redes de Difracción. Obtenido de IES Martín Rivero: <https://blogsaverroes.juntadeandalucia.es/fisicaquimica/2019/12/04/redes-de-difraccion/>
- [4] Britannica. (20 de julio de 1998). Fraunhofer lines. Obtenido de Britannica: <https://www.britannica.com/science/Fraunhofer-lines>
- [5] Britannica. (28 de febrero de 2020). Diffraction (physics). Obtenido de Britannica: <https://www.britannica.com/science/diffraction>
- [6] Britannica. (26 de abril de 2021). Interference (physics). Obtenido de Britannica: <https://www.britannica.com/science/interference-physics>
- [7] CrashCourse. (10 de julio de 2015). Light: Crash Course Astronomy #24. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=jjy-eqWM38g>
- [8] CrashCourse. (27 de enero de 2017). Light Is Waves: Crash Course Physics #39. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=IRBfpBPELmE>
- [9] Eliana Sánchez, Blog: https://medium.com/@a20183390_21926/isaac-newton-reflexi%C3%B3n-y-refracci%C3%B3n-de-la-luz-2fb8052fdd79
- [10] Insight, Ocean. (24 de mayo de 2017). How does a Spectrometer work? Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=OI3pIvLhVcc>
- [11] Jabr, F. (1 de diciembre de 2012). Scientific American. Obtenido de: How does a spectrograph work? <https://www.scientificamerican.com/article/ancient-stars-how-does-spectrograph-work/>
- [12] Khanacademymedicine. (8 de julio de 2014). Diffraction grating. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=F6dZjuw1KUo>
- [13] Lumen. (s.f.). Multiple slit diffraction. Obtenido de Lumen Physics: <https://courses.lumenlearning.com/physics/chapter/27-4-multiple-slit-diffraction/>
- [14] Marqués, J. L. (15 de febrero de 2002). Red de difracción. Obtenido de <https://www.unirioja.es/dptos/dq/fa/emo/amplia/node1.html>
- [15] NASA. (15 de diciembre de 2015). Tunable Laser Spectrometer on NASA's Curiosity Mars Rover. Obtenido de Mars Curiosity: <https://www.nasa.gov/jpl/msl/pia19086>

- [16] NASA. (s.f.). ChemCam. Obtenido de Mars Curiosity Rover: <https://mars.nasa.gov/msl/spacecraft/instruments/chemcam/>
- [17] NASA. (s.f.). Instruments. Obtenido de Mars 2020 mission perseverance rover: <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/instruments/>
- [18] NASA. (s.f.). Spectroscopy: reading the rainbow. Obtenido de Hubblesite: <https://hubblesite.org/contents/articles/spectroscopy-reading-the-rainbow>
- [19] National Geographic. (31 de mayo de 2018). Mars 101. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=D8pnmwOXhoY&t=1s>
- [20] Obispo, M. M. (2016). TESIS DOCTORAL. Detección de planetas en estrellas activas y estudio de la interacción estrella-planeta: el caso de BD+20 1790. Madrid.
- [21] Puiu, T. (28 de enero de 2021). What exactly is a photon? Definition, properties, facts. Obtenido de ZME Science: <https://www.zmescience.com/science/what-is-photon-definition-04322/>
- [22] Stark, G. (13 de septiembre de 2016). Light (Physics). Obtenido de Britannica: <https://www.britannica.com/science/light>
- [23] Stoner, J. O. (29 de mayo de 2002). Spectroscopy (science). Obtenido de Britannica: <https://www.britannica.com/science/spectroscopy>
- [24] Taranovich, S. (7 de septiembre de 2012). Mars Curiosity Rover: ChemCam laser-induced breakdown spectroscopy unveiled. Obtenido de EDN: <https://www.edn.com/mars-curiosity-rover-chemcam-laser-induced-breakdown-spectroscopy-unveiled/>
- [25] Theremino. (s.f.). Theremino Spectrometer. Obtenido de <https://www.theremino.com/en/downloads/automation#spectrometer>
- [26] Veritasium. (19 de febrero de 2013). The Original Double Slit Experiment. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=Iuv6hY6zsd0>
- [27] Wikipedia. (1 de septiembre de 2021). Sepectral line. Obtenido de https://en.wikipedia.org/wiki/Spectral_line
- [28] Wright, R. (11 de octubre de 2021). Multiple Slit Diffraction. Obtenido de <https://www.andrews.edu/~rwright/physics/worksheets/Physics%2011-09%20Multiple%20Slit%20Diffraction.pdf>