

Medición de la absorbancia y espectros para líquidos de distintas concentraciones de soluto

Integrantes:

- Valentino Giovannelli-valentinog491@gmail.com
- Juan Manuel Carrizo-jnmcrzz@gmail.com
- Gonzalo Gareis Arnedo-gonzagareis2003@gmail.com

Laboratorio de ondas, Departamento de Física, Facultad de ciencias exactas de la Universidad de Buenos Aires

Resumen:

El objetivo de este experimento fue verificar la ley de Beer–Lambert midiendo la absorbancia de mezclas coloreadas con distintas concentraciones de soluto. Para ello se construyó un espectrómetro formado por un objetivo de microscopio, una rendija de apertura variable, dos lentes convergentes y una red de difracción, calibrado mediante la comparación con un espectro de referencia. Además, se evaluó la linealidad de la cámara empleando la ley de Malus, confirmando que su respuesta es aproximadamente proporcional a la intensidad incidente. Con el sistema calibrado se registraron los espectros transmitidos por soluciones de diferentes colorantes, obteniéndose los valores de absorbancia correspondientes. Los resultados muestran en su mayoría una relación lineal creciente entre la concentración y la absorbancia, en concordancia con la ley de Beer–Lambert, y permiten identificar las regiones del espectro absorbidas o transmitidas según el colorante utilizado.

Introducción:

La difracción es el fenómeno por el cual una onda luminosa se desvía y modifica su frente de ondas al atravesar una abertura cuyas dimensiones son comparables con su longitud de onda. En una red de N rendijas igualmente espaciadas, el patrón resultante combina difracción e interferencia. Los máximos principales aparecen cuando se cumple

$$d \frac{Y}{D} = m\lambda, \quad (1)$$

siendo d la separación entre rendijas, Y la posición del máximo de orden m , D la distancia de la pantalla de observación a la fuente. Esto permite separar con precisión las distintas longitudes de onda presentes en una fuente. La envolvente asociada a la difracción de cada abertura determina la intensidad relativa de esos máximos.

La capacidad de distinguir dos longitudes de onda próximas se describe mediante el criterio de Rayleigh, que establece que dos líneas están resueltas cuando el máximo de una coincide con el primer mínimo de la otra. Este criterio cuantifica la resoluciónpectral de una red.

El espectro es la representación de la intensidad luminosa en función de la longitud de onda. En este trabajo se observa el espectro emitido por una linterna, compuesto por un continuo de longitudes de onda correspondientes a la radiación visible. El instrumento utilizado para registrar y analizar dicha distribución se denomina espectrómetro, el cual permite dispersar la luz (mediante prismas o redes) y medir la intensidad relativa de cada componente espectral.

Las lentes convergentes son elementos capaces de desviar los rayos luminosos de modo que estos se crucen en un punto denominado foco. Dependiendo de la posición del objeto, la lente puede formar imágenes reales o virtuales, y con distintos grados de aumento o reducción.

Un haz colimado es aquel cuyos rayos son paralelos entre sí, sin converger ni diverger. Para obtenerlo, se coloca una fuente puntual en el plano focal de una lente convergente: la lente toma el haz originalmente divergente y lo transforma en un conjunto de rayos paralelos.

La ley de Beer–Lambert describe la atenuación de un haz luminoso al atravesar un medio absorbente. Establece que

$$I = I_0 10^{-\varepsilon cl} = I_0 10^{-A}, \quad (2)$$

donde I_0 es la intensidad incidente, I la transmitida, ε es la absorbtividad del medio, c es la concentración de soluto y l la longitud del recorrido óptico y A es la absorbancia. Esta ley implica que la absorción es proporcional tanto a la concentración de las especies absorbentes como al espesor del medio. En espectroscopía, permite cuantificar cómo diferentes longitudes de onda se atenúan de manera distinta, relacionando directamente la disminución de intensidad con la composición del material atravesado.

Desarrollo experimental:

Para realizar el análisis se implementaron dos montajes experimentales. El primero de ellos se muestra en la Figura 1. En este diseño, una linterna actúa como fuente extensa e ilumina un objetivo de microscopio, encargado de transformar el haz incidente en una fuente puntual. El haz resultante atraviesa una rendija de abertura variable, utilizada para controlar la intensidad luminosa.

Luego, la luz pasa por una lente convergente de distancia focal $f_1 = 6 \text{ cm}$, cuya función es colimar el haz antes de incidir sobre la red de difracción. El patrón difractado es recogido posteriormente por una segunda lente convergente de distancia focal $f_2 = 15 \text{ cm}$, que reduce el tamaño de la imagen y la proyecta sobre una pantalla ubicada en su plano focal.

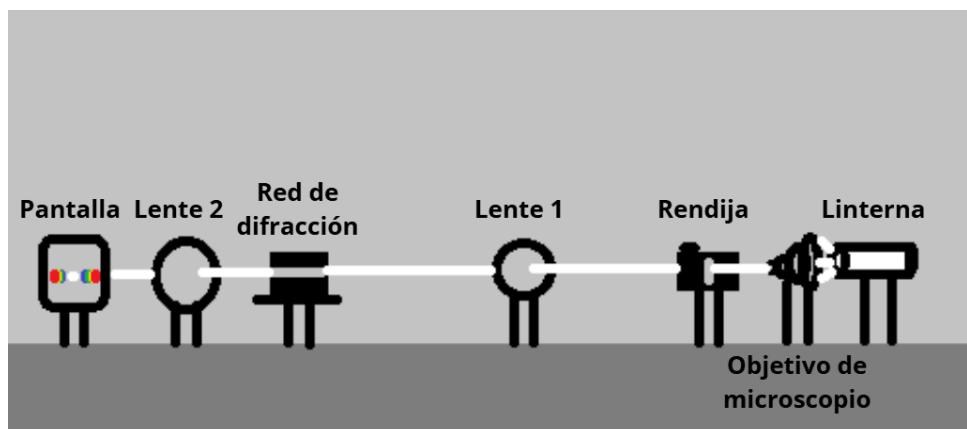


Figura 1: Primer diseño experimental utilizado donde se observa una linterna, cuya luz atraviesa un objetivo de microscopio, generando un haz puntual, el cual atraviesa una rendija de abertura variable, lo que permite variar la intensidad de la imagen final. Dicho haz posteriormente pasa por una primera lente, la cual se encarga de colimar este haz, el cual luego atraviesa una red de difracción y posteriormente una segunda lente convergente, para ser finalmente observado el espectro en una pantalla.

Este montaje permitió obtener una imagen pequeña y de intensidad suficiente para observar y caracterizar el espectro emitido por la linterna. Las imágenes del espectro fueron registradas con la cámara de un teléfono celular y analizadas mediante la aplicación ImageJ, midiendo la intensidad en escala de grises para reconstruir la distribución espectral. Además, se comparó cualitativamente el espectro obtenido con el registrado por un espectrómetro de referencia (Thorlabs).

El propósito principal de esta etapa fue determinar las distancias óptimas para visualizar con claridad los distintos órdenes de difracción y establecer una calibración adecuada para el espectrómetro montado.

En la figura 2 puede observarse el segundo diseño experimental utilizado, el cual consta básicamente de los mismos elementos que el primer diseño, con el añadido de un diafragma, el cual ayuda a eliminar la luz no deseada proveniente de fuera del diseño, y un soporte para cubetas, donde se utilizarán cubetas con agua y colorantes de distintos colores en distintas concentraciones cada uno, con el objetivo de observar cómo varía la intensidad en la pantalla en función de la concentración del líquido.

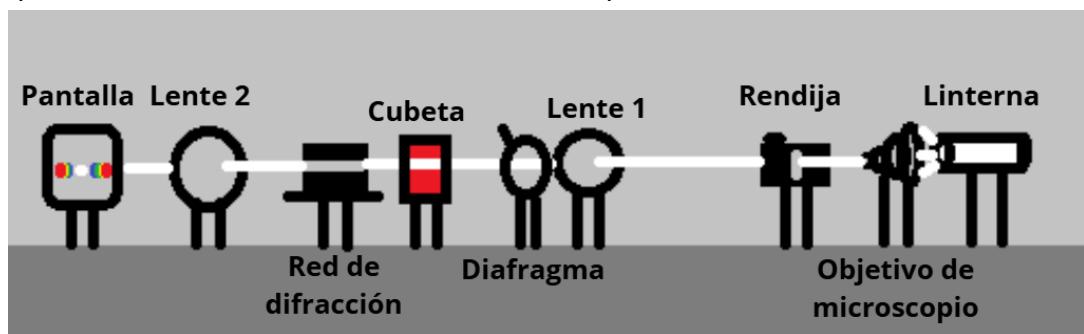


Figura 2: Segundo diseño experimental utilizado, similar al primero, con la adición de un diafragma para controlar la dispersión del haz, y una cubeta donde se colocaran las distintas soluciones.

Este segundo esquema permitió medir la variación de la intensidad transmitida por cada solución y, a partir de ello, calcular la absorbancia para cada concentración. El objetivo final fue verificar experimentalmente el cumplimiento de la ley de Beer–Lambert.

Resultados:

En la figura 3 se presenta el ajuste no lineal realizado sobre los datos adquiridos con la cámara Logitech. La intensidad medida se analizó en función del ángulo entre dos polarizadores sucesivos y se ajustó mediante la ley de Malus.

El propósito principal de este análisis es evaluar si la respuesta del sensor de la cámara es lineal frente a variaciones reales de intensidad luminosa. Si la cámara registra la intensidad de manera proporcional a la luz recibida, entonces los puntos experimentales deben seguir la curva predicha por la ley de Malus.

En el gráfico se observa que la medición correspondiente a 50° presenta una desviación respecto del ajuste teórico. Esta discrepancia puede deberse a incertidumbres experimentales, como luz ambiental residual, pequeñas imprecisiones en la orientación de los polarizadores o no uniformidad en la respuesta del sensor. Sin embargo, considerando el conjunto de los datos, la tendencia general reproduce de manera satisfactoria la forma teórica de la ley de Malus.

Por lo tanto, se concluye que, dentro de las incertidumbres experimentales, la cámara presenta un comportamiento aproximadamente lineal frente a los cambios de intensidad luminosa producidos por la rotación del polarizador.

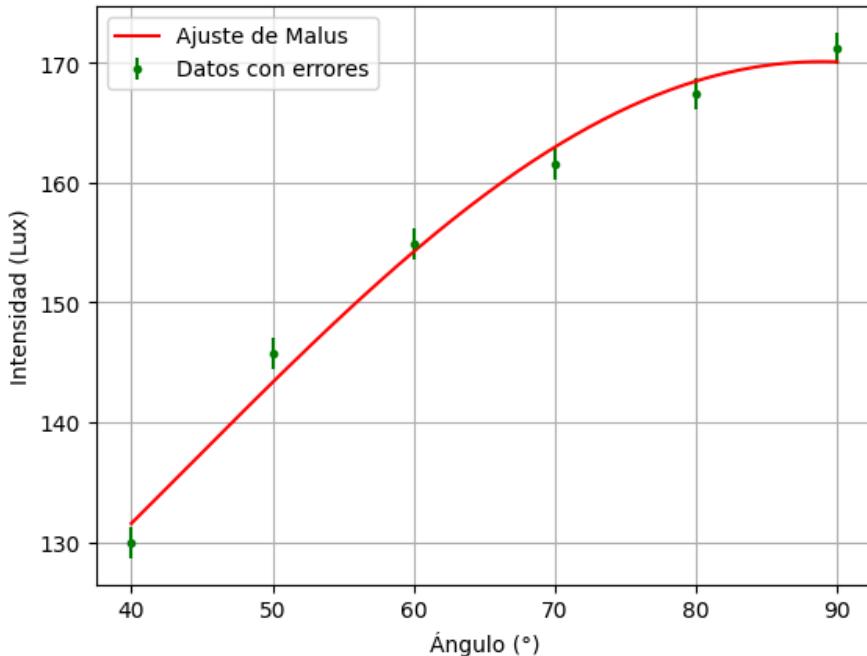


Figura 3: Mediciones de intensidad captada en función del ángulo del eje del polarizador. Ajuste realizado basado en la Ley de Malus.

En las figuras 4, 5 y 6 puede observarse en las figuras de la izquierda cómo varía la intensidad medida para cada longitud de onda que conforma el espectro resultante para cada mezcla y cada correspondiente concentración, mientras que en las figuras de la derecha se observa como varía la absorbancia para cada longitud de onda del espectro visible, para cada concentración de mezcla dada.

Puede observarse que las mediciones conllevan el comportamiento esperado, viendo cómo a mayor concentración la intensidad es la mínima, aumentando a medida que la mezcla se encuentra más diluida. A su vez se observa cómo la absorbancia aumenta conforme aumenta la concentración de soluto en las soluciones

Para el color verde se puede ver cómo además de disminuir la intensidad general del espectro, este aplaca a las longitudes de onda correspondientes al color azul (Aproximadamente entre 450 nm y 495 nm).

Un caso similar pero más extremo es el del color rojo, el cuál aplacó completamente el color azul cuando su concentración fue del 100%. Cabe destacar que en el caso de la concentración de 100% del rojo se observa un comportamiento no esperado en el rango de los 525 nanómetros, ya que como se puede ver como la concentración de 80% tiene un pico que supera a la de 100%.

Para el caso del violeta el espectro es más complejo ya que este color es la combinación de azul con rojo, por lo que se puede observar cómo no solo no aplaca el color azul si no que hace aparecer longitudes de onda aún menores. Se puede ver cómo el violeta tiende a aplacar la intensidad de mayor manera que los otros colores.

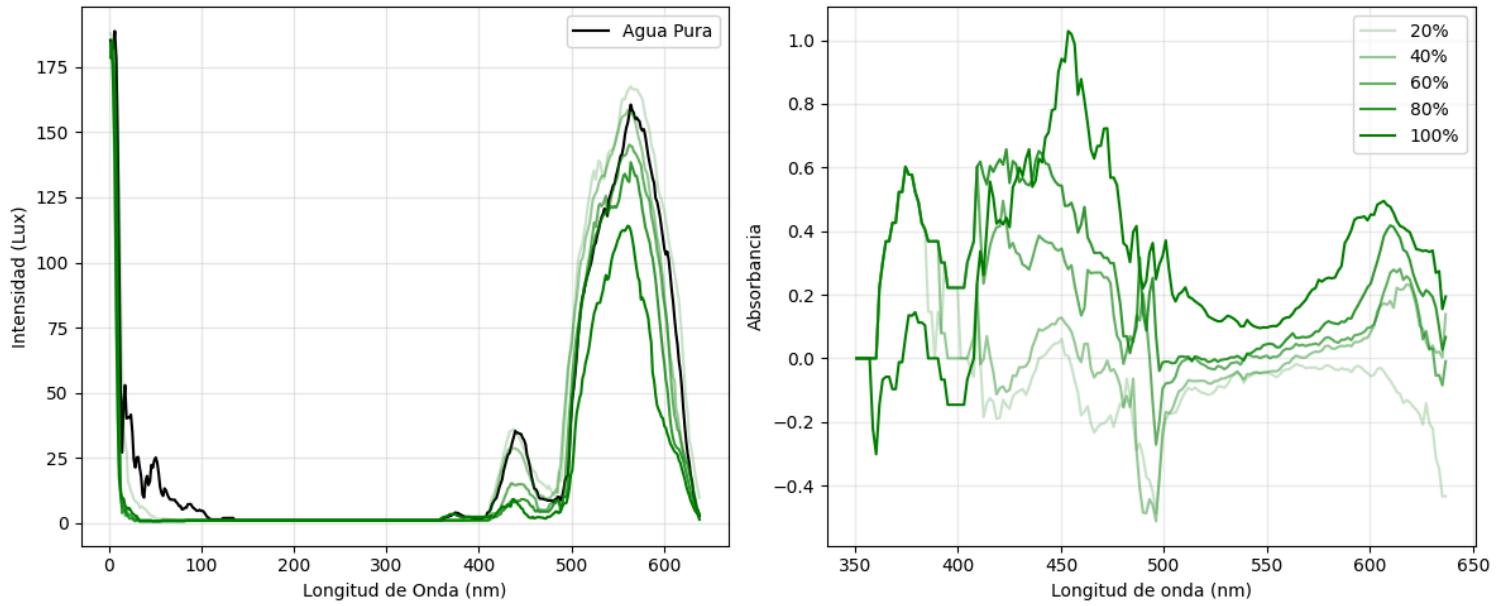


Figura 4: Mediciones de intensidad captada para cada longitud de onda del espectro en el caso de una mezcla de colorante verde. Mediciones de absorbancia para cada longitud de onda contenida en el espectro visible para cada concentración de mezcla. En negro se observa la curva de intensidad medida para una mezcla de agua pura con concentración de soluto 0.

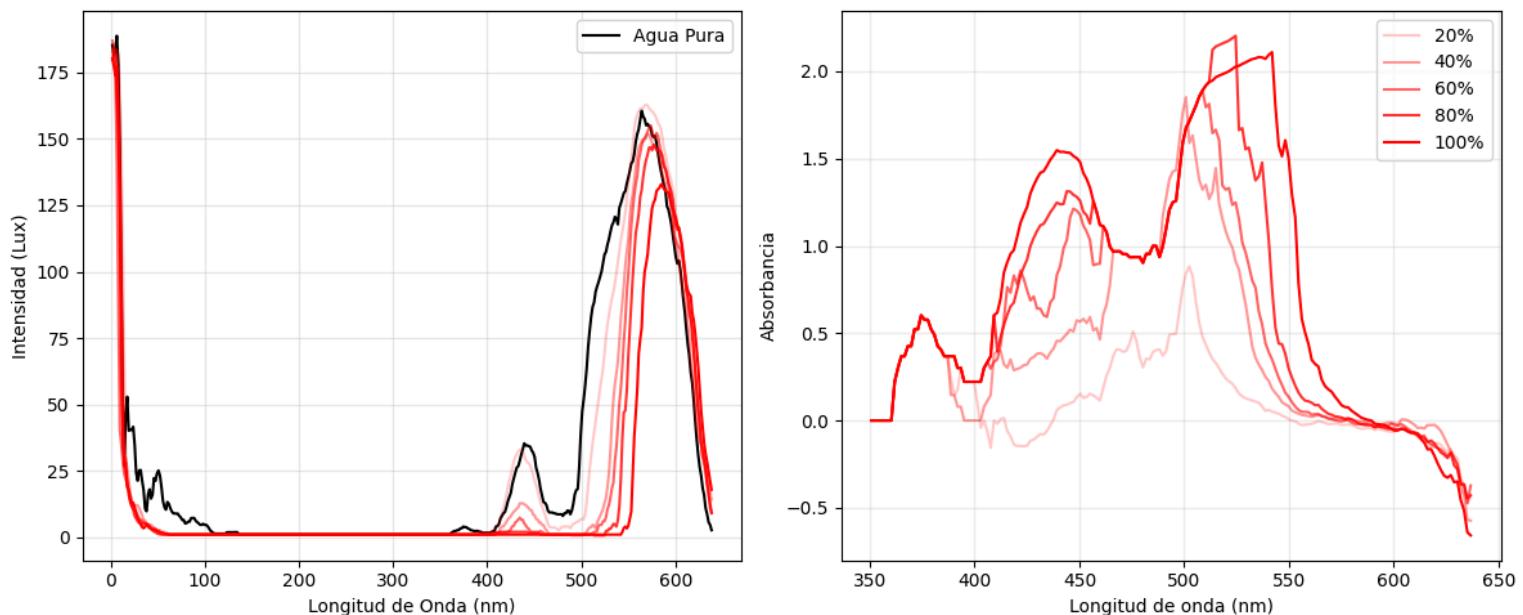


Figura 5: Mediciones de intensidad captada para cada longitud de onda del espectro en el caso de una mezcla de colorante rojo. Mediciones de absorbancia para cada longitud de onda contenida en el espectro visible para cada concentración de mezcla. En negro se observa la curva de intensidad medida para una mezcla de agua pura con concentración de soluto 0.

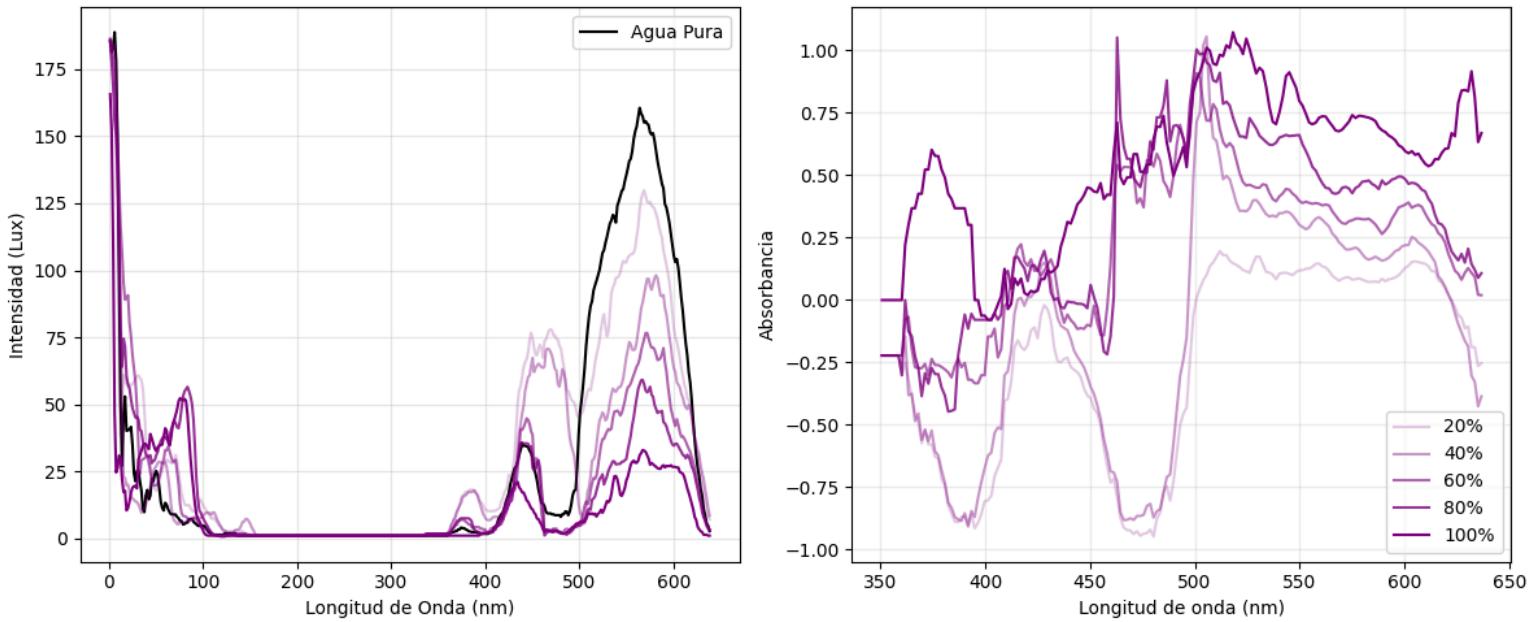


Figura 6: Mediciones de intensidad captada para cada longitud de onda del espectro en el caso de una mezcla de colorante violeta. Mediciones de absorbancia para cada longitud de onda contenida en el espectro visible para cada concentración de mezcla. En negro se observa la curva de intensidad medida para una mezcla de agua pura con concentración de soluto 0.

Seguidamente, se utilizó la relación dada por la ecuación 2 para obtener los valores de absorbancia dependiendo de la concentración de la mezcla, donde para los colores violeta y verde podemos observar en la figura 7 un comportamiento lineal, como es de esperarse, teniendo un aumento en la absorbancia a medida que se aumenta la concentración de soluto en la mezcla, mientras que para el rojo se observa como el ajuste lineal no se adapta de manera apropiada a las mediciones. Se cree que el punto problemático es la medición de 100% de concentración de soluto, donde se ve un salto en el valor de la absorbancia que no sigue la tendencia dada por las concentraciones anteriores.

Dicha discordancia con lo esperado se cree que proviene de un error en la medición causado por la cámara, la cual pudo haber atenuado la luz captada, de forma tal que no se llegara a apreciar por completo la intensidad y el espectro realmente observado para dicha concentración.

Los valores de longitud de onda elegidos para realizar el ajuste fueron aquellos donde la intensidad fue máxima. Esto debido a que en el pico principal de los gráficos de intensidad en función de la longitud de onda para cada porcentaje de concentración se puede observar que la diferencia de intensidad entre el pico de una concentración específica y su siguiente son notablemente diferentes, lo cual facilita el análisis de la absorbancia para una longitud de onda específica.

Los datos de absorbancia graficados han sido considerados con sus respectivos errores. Dichos errores se obtienen con la fórmula de propagación de error utilizando la Ley de Beer-Lambert como modelo y las intensidades de los pigmentos y del agua pura como variables. De esta manera se llega a que a menor valor de Intensidad del pigmento (mayor valor de absorbancia), mayor valor del error relativo a dicha medición. Este resultado concuerda con lo observable en la figura 7.

Aun así, el comportamiento de los puntos previos al caso de concentración total de pigmento rojo muestran un comportamiento lineal, lo cual permite validar la ley de Beer-Lambert en este experimento.

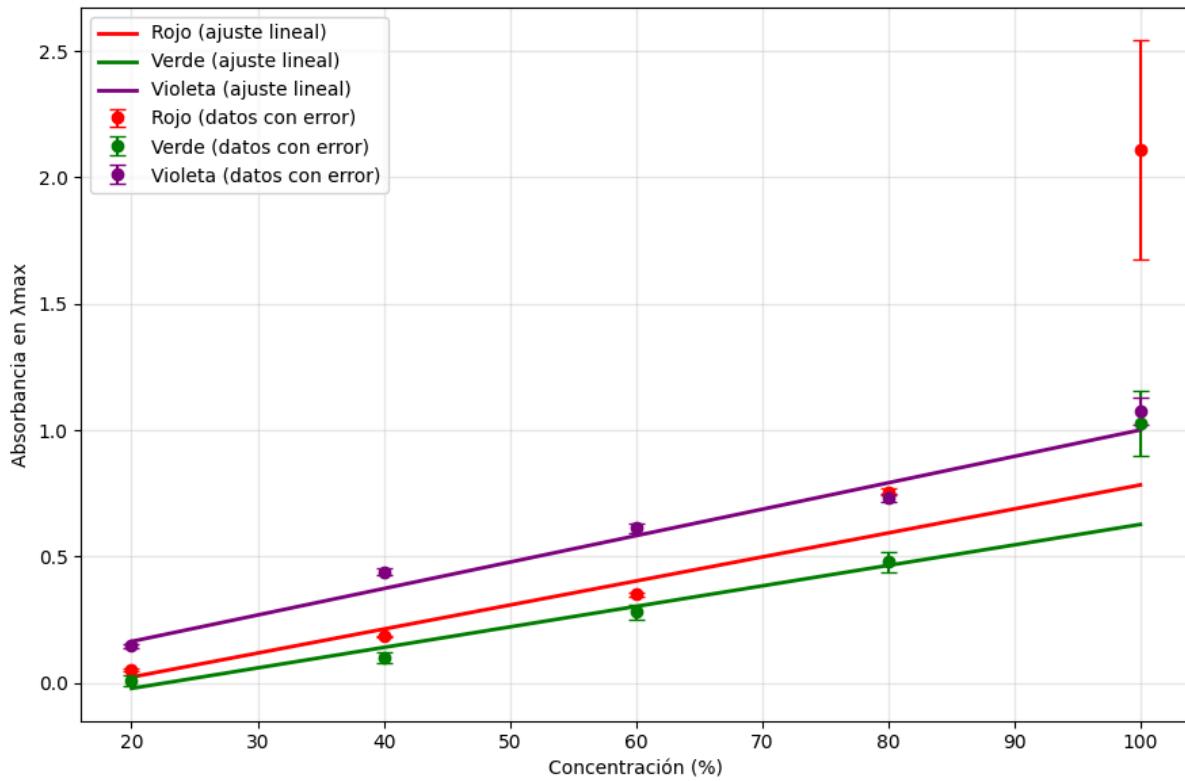


Figura 7: Mediciones del valor de la absorbancia en λ_{max} obtenida para cada mezcla en función de la concentración de la misma. Ajustes lineales realizados sobre dichas mediciones basados en la ley de Beer-Lambert. Datos con errores obtenidos mediante propagación de error del modelo de Beer-Lambert.

Conclusiones:

Para llevar a cabo este experimento en primera medida se calibró el espectrómetro utilizado mediante una comparación del espectro obtenido con el mismo espectro pero medido con un espectrómetro de referencia. Además, se corroboró la linealidad en la respuesta de la cámara utilizada mediante la utilización de la Ley de Malus.

Con esto corroborado, fue posible comprobar el cumplimiento de la ley de Beer-Lambert, observando como a una mayor concentración de soluto en una mezcla la absorbancia de dicho líquido es mayor que a menores concentraciones, teniendo dicha relación un comportamiento lineal.

También se comprobó que las mezclas absorben distintas longitudes de onda según su color, de acuerdo con su composición. Las soluciones de colores primarios (rojo y verde) mostraron una absorbancia marcada en amplios rangos del espectro, mientras que la solución violeta, al ser un color secundario, permitió el paso de una mayor cantidad de longitudes de onda, aunque con intensidades menores en todas las concentraciones en comparación con las soluciones primarias.

Si bien se obtuvieron de manera satisfactoria los espectros y valores de absorbancia para las tres soluciones y sus respectivas concentraciones, puede concluirse que este no es

el método más eficiente para este tipo de mediciones. La complejidad del armado del espectrómetro, junto con la necesidad de extremar cuidados durante todo el proceso experimental, limita su practicidad.

Una vez ensamblado, el sistema no puede ser manipulado sin alterar la calibración; además, requiere un ambiente oscuro y un espacio amplio para visualizar adecuadamente el patrón de difracción. La ausencia de una fuente puntual de luz dificulta aún más la alineación del sistema.

A esto se suma la necesidad de contar con una cámara de buena calidad: si el sensor se satura, el registro del espectro se vuelve inutilizable, comprometiendo la medición.

En conjunto, los resultados obtenidos son consistentes y permiten validar los principios estudiados, aunque el método experimental presenta limitaciones prácticas que deberían considerarse en futuras implementaciones.

Bibliografía:

- Depine, R.A, *Ondas*, 2020, Capítulo 9: Difracción
- T. Mayerhöfer, S. Pahlow y J. Popp, “The Bouguer-Beer-Lambert Law: Shining Light on the Obscure”, 2020