

# Un simple fotómetro con luz UV de bajo costo para la enseñanza experimental de la ley de Beer-Lambert

Evelyn Toque-Huaman 

Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Lima. Perú. [pcinetq@upc.edu.pe](mailto:pcinetq@upc.edu.pe)

Julio David Gonzales Balladares 

Universidad de Ingeniería y Tecnología. Lima. Perú. [julio.gonzalesb@ciplima.org.pe](mailto:julio.gonzalesb@ciplima.org.pe)

[Recibido: 27 junio 2023, Revisado: 15 enero 2024, Aceptado: 4 febrero 2024]

**Resumen:** El artículo presenta un fotómetro de bajo costo para la enseñanza experimental, diseñado para determinar cromo hexavalente en soluciones acuosas, basado en la detección de iones cromato de color amarillo con una luz ultravioleta a 373 nm. Este procedimiento reemplaza al método colorimétrico que emplea un espectrofotómetro para la detección del complejo 1,5-difenilcarbazida de color rojo-violeta a 540 nm. Para demostrar el funcionamiento del fotómetro se evaluó la ley de Beer-Lambert mediante la técnica de regresión lineal y se compararon los valores de absorbancia obtenidas por el fotómetro con un espectrofotómetro UV-Vis de marca Shimadzu de la serie UV-2600 en cinco muestras de cromo hexavalente en el rango de 1 – 25 mg L<sup>-1</sup>. Los resultados experimentales demostraron la linealidad requerida por la ley de Beer-Lambert con un coeficiente de determinación de 0,9988, y similitud entre ambos instrumentos analíticos con una relación de 1,0041 entre los valores de absorbancia con un coeficiente de determinación de 0,9993. En conclusión, el fotómetro de bajo costo es una excelente propuesta para la enseñanza de la ley de Beer-Lambert en el aula porque reduce la formación de residuos y prescinde de los reactivos del método colorimétrico.

**Palabras clave:** Enseñanza experimental; fotómetro; cromo hexavalente Cr(VI); ultravioleta; espectrofotómetro UV-Vis

## A simple low-cost UV light photometer for experimental teaching of the Beer-Lambert law

**Abstract:** This article presents a low-cost photometer for experimental teaching designed to determine hexavalent chromium in aqueous solutions based on the detection of yellow chromate ions with ultraviolet light at 373 nm. This procedure replaces the colorimetric method that uses a spectrophotometer for the detection of the red-violet 1,5-diphenylcarbazide complex at 540 nm. To demonstrate the operation of the photometer, the Beer-Lambert law was evaluated using the linear regression technique, and the absorbance values obtained by the photometer were compared with those of a Shimadzu UV-2600 series UV-Vis spectrophotometer in five samples of hexavalent chromium in the range of 1 – 25 mg L<sup>-1</sup>. The experimental results demonstrated the linearity required by the Beer-Lambert law with a determination coefficient of 0.9988, and similarity between both analytical instruments with a relationship of 1.0041 between the absorbance values with a determination coefficient of 0.9993. In conclusion, the low-cost photometer is an excellent proposal for teaching the Beer-Lambert law in the classroom because it reduces the formation of waste, and dispenses with the reagents of the colorimetric method.

**Keywords:** Experiential teaching; photometer; hexavalent chromium Cr(VI); ultraviolet; UV-Vis spectrophotometer

**Para citar este artículo:** Toque-Huaman, E., Gonzales Balladares, J. D. (2024). Un simple fotómetro con luz UV de bajo costo para la enseñanza experimental de la ley de Beer-Lambert. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*. 21(3), 3401. doi:10.25267/Rev\_Eureka\_ensen\_divulg\_cienc.2024.v21.i3.3401

## Introducción

El alto costo de los espectrofotómetros es uno de los mayores obstáculos para la enseñanza de la espectrometría. Por esta razón, es necesario diseñar equipos alternativos de bajo costo adecuados para el análisis químico instrumental en el aula (Montoya et al., 2013; Moreira et al., 2016).

La enseñanza experimental es activa y permite a los estudiantes emplear sus conocimientos para solucionar problemas (Ramírez-Silva y Rojas-Hernández, 2012). Por ello, la experimentación en el laboratorio debe ser parte del proceso de enseñanza-aprendizaje (Heredia Avalos, 2006). Pero es común durante las prácticas de laboratorio el uso de un solo espectrofotómetro para un gran grupo estudiantes. Por este motivo, el empleo de varios dispositivos de bajo costo en el aula contribuye con la formación académica al permitir mayor interacción de los estudiantes con los instrumentos analíticos (Montoya et al., 2013; Ramos et al., 2023).

La espectrometría de absorción es una técnica analítica usada para cuantificar la concentración de determinados analitos por medio de la medición de la transmitancia ( $T$ ) y la absorbancia ( $A$ ). La transmitancia es la relación entre la intensidad de la luz incidente ( $P_0$ ), y la intensidad de la luz transmitida ( $P_i$ ), ver ecuación (1). Por su parte, la absorbancia presenta una relación logarítmica inversa con la transmitancia, ver ecuación (2) (Moreira et al., 2016; Poh et al., 2021). Sin embargo, la absorbancia es linealmente proporcional a la concentración del analito solo en el caso de disoluciones suficientemente diluidas según la Ley de Beer-Lambert, ver ecuación (3). Donde  $\epsilon$  es la absorbividad molar,  $b$  es la longitud atravesada por la luz en la solución, y  $C$  es la concentración del analito en la solución (Swinehart, 1962; Cid y González-Fernández, 2020).

$$T = \frac{P_i}{P_0} \quad (1)$$

$$A = -\log [T] \quad (2)$$

$$A = \epsilon \cdot b \cdot C \quad (3)$$

Con base en lo anterior, y por el amplio uso de la espectrometría y la espectrofotometría ultravioleta-visible (UV-Vis) en las aulas. Se justifica la importancia de la enseñanza de los principios fundamentales de los instrumentos analíticos (Almonte et al., 2018). Existen distintos dispositivos empleados para la espectrometría pero muchas veces son poco prácticos para la enseñanza. Sin embargo, los fotómetros tienen un diseño sencillo que facilita el proceso de aprendizaje de la espectrometría, son económicos en comparación con los espectrofotómetros. Por último, estos instrumentos analíticos están conformados simplemente por una fuente de luz monocromática, un compartimiento para muestras, un fotodetector, y un dispositivo para medir la atenuación de la luz (Skoog et al., 2009).

La novedad en nuestro estudio es el diseño de un fotómetro con luz UV de bajo costo para la enseñanza experimental de la ley de Beer-Lambert mediante el método directo UV descrito por Sanchez-Hachair y Hofmann (2018) en reemplazo del método colorimétrico (ASTM D1687-1) para la determinación de cromo hexavalente (Cr(VI)). Con el objetivo de contribuir con la enseñanza de la espectrometría, y beneficiar a los estudiantes universitarios. Con este fin, el presente estudio pretende disminuir el tiempo de preparación de muestras, eliminar el uso de reactivos, y reducir la formación de residuos durante la práctica de laboratorio.

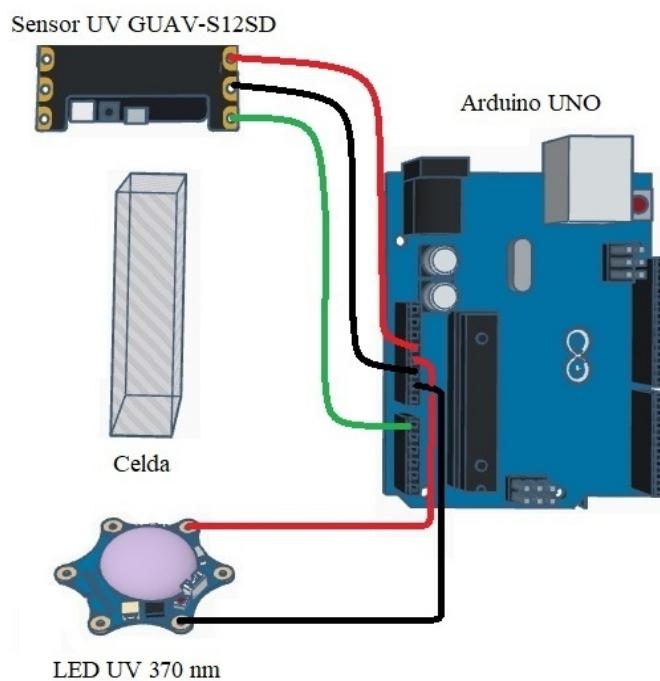
## Materiales y métodos

El método colorimétrico estándar (ASTM D1687-1) es usado para determinar Cr(VI) a 540 nm con un espectrofotómetro Vis en el rango de 0,1 – 1,0 mg L<sup>-1</sup>. Para ello, las muestras son aciduladas (pH=2) con ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), luego se hacen reaccionar con acetona, y 1,5-difenilcarbazida (DPC), y finalmente esperar por la formación de un complejo de 1,5-difenilcarbazida de color rojo-violeta (Onchoke y Sasu, 2016). En contraste, el método directo UV solo requiere alcalinizar las muestras (pH=10) con hidróxido de potasio (KOH) para lograr detectar el ion cromato a 373 nm con un espectrofotómetro UV en el rango de 1 – 25 mg L<sup>-1</sup> (Sanchez-Hachair y Hofmann, 2018).

Para demostrar el funcionamiento del fotómetro se evalúa la ley de Beer-Lambert mediante la técnica de regresión lineal por el método de los mínimos cuadrados en cinco muestras de Cr(VI) en el rango de 1 – 25 mg L<sup>-1</sup>. De manera similar mediante la técnica de regresión lineal los valores de absorbancia obtenidas por el fotómetro se comparan con un espectrofotómetro UV-Vis de marca Shimadzu de la serie UV-2600.

### Diseño del fotómetro

El fotómetro está conformado con un diodo emisor de luz (LED) UV (370 – 375nm) de 3W, un fotodetector GUVA-S12SD, una celda de plástico para espectrómetros con base de 1 cm × 1 cm, y una placa de desarrollo Arduino UNO. Ensamblados dentro una caja de bricolaje de madera de densidad media (MDF) de 15 cm × 10 cm × 7.5 cm con una tapa para protegerse de la luz UV durante su funcionamiento. La configuración de los componentes electrónicos del fotómetro se muestra en la figura 1.



**Figura 1.** Diseño de un fotómetro con luz UV empleado en laboratorio de ciencias para la enseñanza experimental de la ley de Beer-Lambert.

La construcción del fotómetro se basó en las guías de la placa de desarrollo Arduino relacionadas al sensor GUVA-S12SD, y en los principios fundamentales de espectrometría empleados en los fotómetros descritos por Almonte et al. (2018) y Moreira et al. (2016).

Con los datos de la tabla 1 se determina un costo de 13 USD para el fotómetro. Para obtener los valores de  $T$  y  $A$  se emplean hojas de cálculo en Excel que resuelven la ecuación (1) y la ecuación (2). Pero, previamente, se registran los valores del voltaje de cada muestra por medio de un sketch de Arduino, y se guardan estos valores en un archivo .txt por medio de un script en Python ejecutado en Spyder. Todos los datos que respaldan este estudio están disponibles en Mendeley Data (Gonzales-Balladares y Toque-Huaman., 2024).

**Tabla 1.** Precio de los componentes usados en el diseño del fotómetro usado para detectar Cr(VI) con luz ultra violeta.

Cantidad	Componentes	Precio (USD)
1	LED UV de 370 nm	2,00
1	Fotodetector GUVA-S12SD	2,00
1	Celda de plástico para espectrofotómetro	1,00
1	Arduino UNO	4,00
5	Cables de 10 cm	1,00
1	Caja de bricolaje de MDF	3,00
Total		13,00

## Resultados y discusión

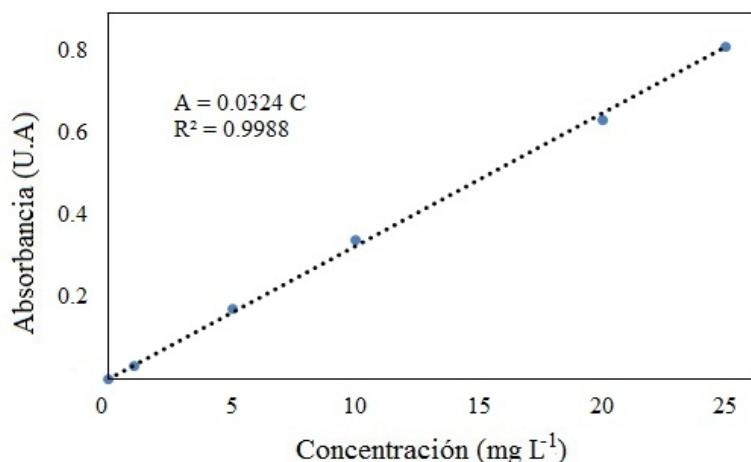
Para demostrar el funcionamiento del fotómetro se hicieron 60 lecturas de voltaje a las muestras tres veces, y luego se obtuvo su promedio aritmético. Para elaborar las muestras se prepararon cinco diluciones de  $K_2Cr_2O_7$  en un medio alcalino ( $pH = 10$ ) con concentraciones de 1, 5, 10, 20 y 25  $mg\ L^{-1}$  de Cr(VI) para obtener  $P_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5$ ), y un blanco de calibración de 0  $mg\ L^{-1}$  para obtener  $P_0$ . Posteriormente, para obtener de  $T$  y  $A$  mostrados en la tabla 2 se emplearon la ecuación (1) y la ecuación (2).

**Tabla 2.** Valores adimensionales de  $T$  y  $A$  promedios obtenidos por el fotómetro con un LED UV (370 – 375nm).

$P_i$	Voltaje (mV)	Transmitancia	Absorbancia
0	2236,85	1,00	0,00
1	2073,23	0,92	0,03
2	1502,06	0,67	0,17
3	1018,33	0,45	0,34
4	520,90	0,23	0,63
5	343,48	0,15	0,82

Para demostrar la relación lineal entre la concentración de Cr(VI), y los valores adimensionales de la absorbancia (U.A) de la tabla 2. Se realizó la técnica de regresión lineal por el método de mínimo cuadrados (ver figura 2) obteniéndose la ecuación (4) con un coeficiente de determinación  $R^2=0.9988$ . Esta ecuación tiene relación con la ecuación (3) es una recta con intersección en el eje de coordenadas, y tiene un valor de  $R^2$  equivalente a uno. Por ello, la ecuación (4) cumple con lo establecido por la ley de Beer-Lambert descrita por Swinehart (1962).

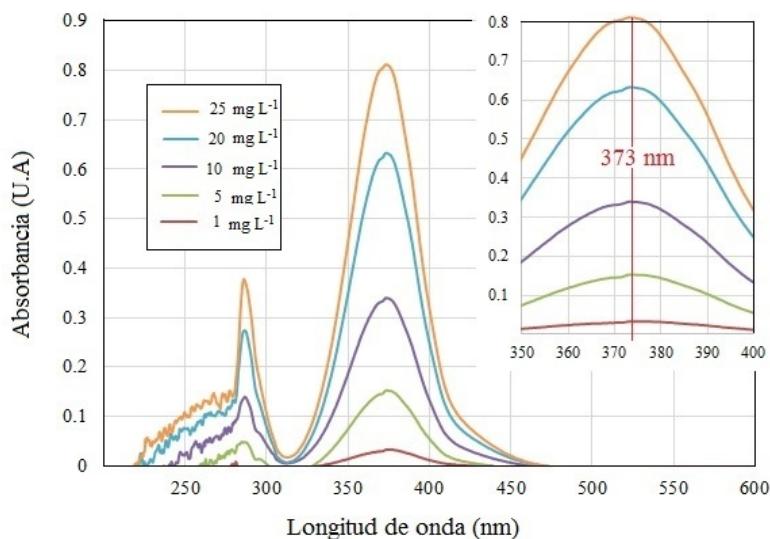
$$A = 0,0324 C \quad (4)$$



**Figura 2.** Absorbancia obtenidas por el fotómetro con luz UV en soluciones de 0 a 25 mg L<sup>-1</sup> de Cr(VI) en condición de pH= 10.

### Comparación entre un espectrómetro UV-Vis y el fotómetro

Para comprobar la detección de Cr(VI) con el fotómetro por medio del método directo UV mencionado por Sanchez-Hachair y Hofmann (2018). Se compararon los valores de  $A$  de las cinco muestras de Cr(VI) de la tabla 2 con un espectrofotómetro UV-Vis de la marca Shimadzu de la serie UV-2600. Para ello, previamente con el espectrofotómetro se determinó la longitud de onda de la absorbancia máxima generada por las muestras de Cr(VI) en la región del espectro UV (ver figura 3), encontrándose el valor de longitud de onda (373 nm) similar al obtenido por Sanchez-Hachair y Hofmann (2018).

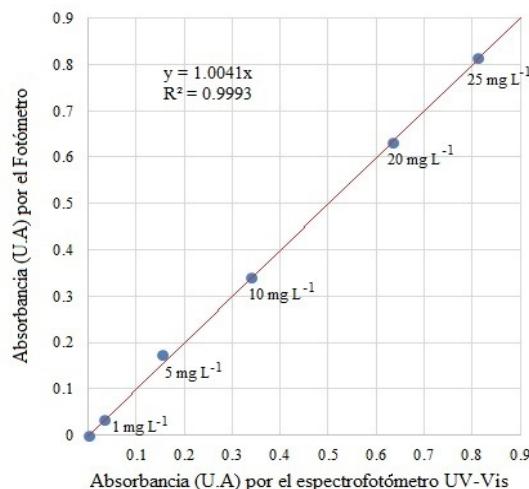


**Figura 3.** Repuestas espectrales de las soluciones de Cr(VI) detectadas con el espectrofotómetro UV-Vis.

Con el valor de la longitud de onda de 373 nm se obtuvieron los valores de  $A$  en las cinco muestras de Cr(VI) de 1 – 25 mg L<sup>-1</sup> con el espectrofotómetro UV-Vis. Posteriormente, por medio de la técnica de regresión lineal se obtuvo la ecuación (5) con un  $R^2 = 0,9989$ . Esta ecuación es similar a la ecuación (4) reportada por el fotómetro (ver figura 2). Con base en estos resultados se concluyó que ambos instrumentos analíticos cumplen con la ley de Beer-Lambert para la determinación de Cr(VI).

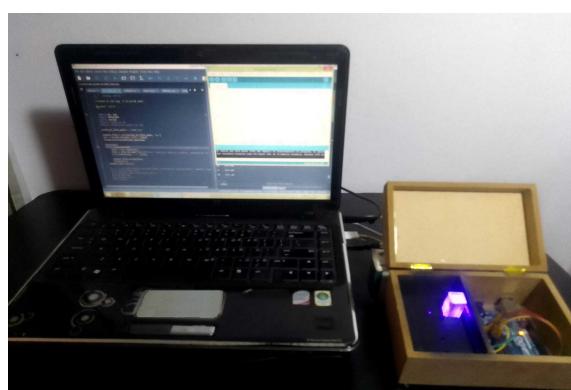
$$A = 0,0323 C \quad (5)$$

Por último, se compararon de manera gráfica los valores de  $A$  obtenidos por ambos instrumentos analíticos. Con este fin, se empleó la técnica de regresión lineal en los valores de absorbancia de las muestras de Cr(VI) de 1 – 25 mg L<sup>-1</sup> reportados por el fotómetro, y el espectrofotómetro UV-Vis a 373 nm. Obteniéndose una ecuación lineal con una relación de 1,004 en los valores de absorbancia entre ambos equipos y un valor de  $R^2 = 0,9993$  (ver figura 4). Esto demuestra que los valores de  $A$  para la misma concentración de Cr(VI) fueron similares en ambos instrumentos analíticos.



**Figura 4.** Comparación entre los valores experimentales de absorbancia obtenidos entre el fotómetro y el espectro UV-Vis.

El diseño de un fotómetro con luz UV (figura 5) para el uso en los laboratorios de ciencias a nivel universitario cumplió con lo establecido en la ley de Beer-Lambert en la determinación de Cr(VI), y obtuvo valores de absorbancia similares a los hallados por el espectrofotómetro UV-Vis comercial. Además, se comprobó que el método UV propuesto por Sanchez-Hachair y Hofmann (2018) reduce el uso de reactivos, y el tiempo en la preparación de muestras al compararlo con el método colorimétrico estándar ASTM D1687-1 en el rango de 1 – 25 mg L<sup>-1</sup> de Cr(VI). Finalmente el costo del fotómetro de 13 USD es menor en comparación con el precio de 1000 USD de los espectrómetros portátiles mencionados por Crocombe (2018). De esta manera el fotómetro contribuye con la enseñanza de la espectrofotometría al ser asequible para los estudiantes y para las instituciones universitarias.



**Figura 5.** Representación de un fotómetro con luz UV elaborado con materiales de bajo costo con la tapa abierta para mostrar el funcionamiento de sus componentes por un breve momento.

## Conclusiones

Este estudio presentó un fotómetro para la enseñanza experimental diseñado para determinar Cr(VI) en el rango de 1 – 25 mg L<sup>-1</sup> por medio del método directo UV en remplazo del método colorimétrico estándar. Su uso en el laboratorio contribuye con la enseñanza de la espectrofotometría a nivel universitario porque disminuye el tiempo de preparación de muestras, elimina el uso de reactivos, y reduce la formación de residuos. Además, su bajo costo, y simple diseño facilita la demostración de la ley de Beer-Lambert en el aula.

## Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado y financiado por la Dirección de Investigación de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC) y por la Universidad de Ingeniería y Tecnología-UTEC.

## Referencias

- Almonte, K. B., Amador, F. C., Hernández, A., Trujillo, M. (2018). Construcción de un fotómetro con leds: Estudio comparativo. *Tendencias en Docencia e Investigación en Química*, 4(4), 61-70. <http://hdl.handle.net/11191/8193>
- Cid, R., González-Fernández, D. (2020). Una aproximación a la espectrometría en educación secundaria. *Analés de la Química*, 116(1), 25-29. <https://analesdequimica.es/index.php/AnalésQuímica/article/view/1309>
- Crocombe, R. A. (2018). Portable Spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 72(12), 1701-1751. <https://doi.org/10.1177/0003702818809719>
- Gonzales-Balladares, J. D. y Toque-Huaman, E. (2024). *Diseño de un fotómetro con luz UV de bajo costo* (V1). Mendeley Data. <https://doi.org/10.17632/4jszdxsnws.1>
- Heredia Avalos, S. (2006). Experimentos de química recreativa con sulfato de cobre pentahidratado. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 3(3), 467-484. <https://revistas.uca.es/index.php/eureka/article/view/3851/3429>
- Montoya, E., Baltuano, Ó., Arbildo, A. (2013). Espectrómetro para radiación visible hecho en casa, de bajo costo y altas prestaciones. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 79(1), 80 - 91. [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1810-634X2013000100011](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2013000100011)
- Moreira, A. F., Santos, S. D., Junior, A. C. (2016). Construção e caracterização de um fotômetro destinado ao uso de aulas experimentais de química sobre a lei de Beer-Lambert. *Holos*, 2, 142-151. <https://doi.org/10.15628/holos.2016.4016>
- Onchoke, K. K., y Sasu, S. A. (2016). Determination of hexavalent chromium (Cr(VI)) concentrations via ion chromatography and UV-Vis spectrophotometry in samples collected from nacogdoches wastewater treatment plant, east Texas (USA). *Advances in Environmental Chemistry*, 2016, 1 - 10. <https://doi.org/10.1155/2016/3468635>
- Poh, J-J., Wua, W-L., Gohb, N., Tana, S., y Gana, S. (2021). Spectrophotometer on the go: The development of a 2 in 1 UV-Vis portable Arduino based spectrophotometer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 325, 1 - 8. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112698>

- Ramírez-Silva, M. T., y Rojas-Hernández, A. (2012). La enseñanza experimental de la química general y la química analítica desde la ENEP-Cuautitlán de la UNAM y la UAM-Iztapalapa en el último cuarto del siglo XX. *Educación Química*, 23(1), 136–140. [http://dx.doi.org/10.1016/S0187-893X\(17\)30145-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0187-893X(17)30145-3)
- Ramos, L., Charca, J. R., Veleto, M. I. (2023). Prototipo de un espectrofotómetro modular para la enseñanza de la química. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 20(2), 2401. [https://doi.org/10.25267/Rev\\_Eureka\\_ensen\\_divulg\\_cienc.2023.v20.i2.2402](https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2023.v20.i2.2402)
- Sanchez-Hachair, A., Hofmann, A. (2018). Hexavalent chromium quantification in solution: Comparing direct UV-visible spectrometry with 1,5-diphenylcarbazide colorimetry. *Comptes Rendus Chimie*, 21(9), 890-896. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2018.05.002>
- Skoog, D. A., Holler, F. J., Crouch S., R. (2009). *Princípios de Análise Instrumental*. 6<sup>th</sup> ed., Porto Alegre: Bookman / Grupo A.
- Swinehart, D. F. (1962). The Beer-Lambert Law. *Journal of Chemical Education*, 39(7), 333. <https://doi.org/10.1021/ed039p333>