

# Arduino como alternativa en la enseñanza de la química instrumental: analizador espectroscópico ESPECTRUINO

David Chuquer Solá

Universidad Central del Ecuador

\*Autor para correspondencia: dschuquer@uce.edu.ec

Recibido: 2024/03/27

Aprobado: 2024/11/30

DOI: <https://doi.org/10.26621/ra.v1i31.944>

## RESUMEN

Los recursos limitados existentes en las universidades latinoamericanas dificultan la adquisición y el mantenimiento de equipamiento para el análisis químico en general. Ante ello, el uso de la plataforma de *software* libre Arduino en el área de la química emerge como una alternativa interesante y novedosa que permite suplir esta falencia. La investigación detalla el desarrollo del ESPECTRUINO, un sistema para el análisis de absorbancia, fluorescencia y dispersión de luz en muestras químicas, basado en Arduino. Para ello, se utiliza el paradigma del aprendizaje basado en retos (ABR) para que estudiantes de pregrado (sin conocimientos preliminares de programación) generen el sistema descrito. Se detalla el diseño electrónico, diseño físico, código de programación y el desempeño del sistema en aplicaciones químicas. La inversión realizada para la adquisición de los componentes del equipo fue de 38.55 USD. Los resultados fueron satisfactorios en todos los aspectos evaluados, realizando calibraciones con coeficientes de correlación de Pearson superiores a 0.94 y generando medidas estadísticamente similares a equipos comerciales.

**Palabras clave:** fotometría, fluorometría, turbidimetría, Arduino, aprendizaje basado en retos

## ABSTRACT

The limited resources existing in Latin American universities make it difficult to acquire and maintain equipment for chemical analysis in general. Given this, the use of the Arduino free software platform in chemistry emerges as an interesting and novel alternative that makes it possible to make up for this shortcoming. The research details the development of ESPECTRUINO, a system for the analysis of absorbance, fluorescence, and light scattering in chemical samples based on Arduino. The challenge-based learning (CBL) paradigm is used so that undergraduate students (without preliminary programming knowledge) generate the described system. The electronic design, physical design, programming code, and system performance in chemical applications are detailed. The investment made for the acquisition of the equipment components was 38.55 USD. The results were satisfactory in all aspects evaluated, performing calibrations with Pearson correlation coefficients greater than 0.94 and generating measurements statistically similar to commercial equipment.

**Keywords:** photometry, fluorometry, turbidimetry, Arduino, challenge based learning

David Chuquer Solá  [orcid.org/0000-0003-3223-7590](https://orcid.org/0000-0003-3223-7590)



## INTRODUCCIÓN

La crisis postpandemia de COVID-19 ha provocado un recorte importante de recursos en la investigación y la educación en la mayoría de los países latinoamericanos. Esto ha restringido la accesibilidad a equipamiento especializado en muchas universidades y centros de investigación con recursos limitados. La adquisición de estos equipos especializados de análisis químico implica altos costos y el uso de consumibles delicados y sofisticados, como fuentes de emisión, monocromadores, rejillas de difracción y detectores, los cuales necesitan ser importados, muchas veces están descontinuados y la mayoría de ellos están protegidos por derechos de autor, por lo que la producción nacional de este tipo de sistemas está limitada.

Ante esta realidad, el uso de la plataforma de software libre Arduino® en el área de la química emerge como una alternativa interesante y novedosa en la creación de diferentes sistemas de análisis químico para la enseñanza. Los componentes para su desarrollo son totalmente asequibles en el mercado nacional, como LEDs, fotorresistencias, protoboards y potenciómetros, todos ellos coordinados mediante el microprocesador ARDUINO®. Al ser una plataforma de hardware libre, tanto su diseño como su distribución pueden utilizarse libremente para el desarrollo de cualquier tipo de proyecto sin haber adquirido ninguna licencia, además el entorno de desarrollo de Arduino® es sencillo e intuitivo y puede descargarse gratuitamente desde su página oficial para distintos sistemas operativos (Lledó, 2012). Adicionalmente, el desarrollo de habilidades de creación y desarrollo de sistemas electrónicos permite sacar de la mente de los estudiantes que los equipos de análisis químico son una “caja negra” que solo proporciona datos y les permite explorar de forma sencilla los componentes asociados a un equipo de química instrumental (Sandoval et al., 2013). En química, el uso de Arduino® no es nuevo, ya que, al tener un software y hardware libre, se puede programar para que genere diferentes medidas dependiendo de nuestra necesidad. Esta herramienta se utiliza en la elaboración de termómetros y potenciómetros (Kubínová y Šlégř, 2015), en la obtención de datos electrónicos (Grinias et al., 2016) y también se ha llegado a emplear en tareas más complejas, como la elaboración de fotómetros para la medición de contaminantes (Abdul et al., 2022).

Los objetivos planteados para esta investigación son: a) diseñar un sistema (ESPECTRUINO) que permita, mediante ajustes básicos, ser utilizado como un fotómetro, fluorímetro y turbidímetro y b) realizar aplicaciones químicas relacionadas con el equipo diseñado.

## MÉTODOS

Durante el semestre 2023-1, se planteó a los estudiantes de la materia de Métodos Espectroscópicos 1 de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Central del Ecuador el enfoque de aprendizaje basado en retos, con la meta de diseñar diversos sistemas de análisis químico estudiados en el sílabo de la materia. Los resultados presentados en este trabajo son un resumen de ese ejercicio. Los estudiantes no tenían formación preliminar relacionada con la programación en el lenguaje Arduino®. El desarrollo de la actividad duró ocho semanas. Cada semana se realizaron sesiones sincrónicas de seis horas en las que se expusieron los aspectos teóricos y experimentales de los métodos instrumentales abarcados (4 horas), y se discutió y retroalimentó sobre los avances de cada

grupo (2 horas). Las actividades desarrolladas durante las ocho semanas fueron:

- Semanas 1 y 2: Investigación de los conceptos básicos de programación, funcionamiento de plataforma Arduino y de elementos electrónicos. Búsqueda de antecedentes de la investigación.
- Semanas 3 y 4: Implementación del prototipo y pruebas preliminares de los experimentos. Optimización del funcionamiento del prototipo inicial.
- Semanas 5 y 6: Desarrollo de experimentos y obtención de datos experimentales.
- Semanas 7 y 8: Análisis de datos y desarrollo de informe de actividades de laboratorio. Evaluación final y realización de encuesta.

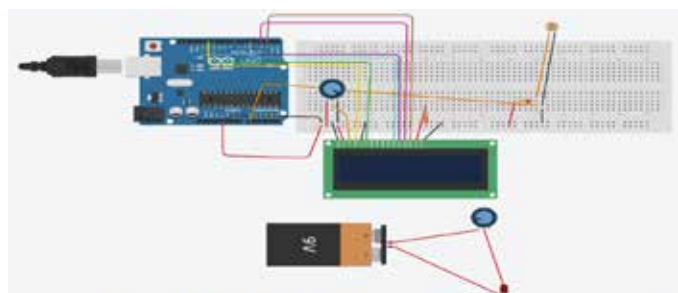


Figura 1. Diseño electrónico del ESPECTRUINO

**Tabla 1.** Lista de costos del material para el desarrollo del ESPECTRUINO

Materiales	Modelo	Precio
Arduino Uno	Versión 3	USD 11
Protoboard	EIC102	USD 2
Pantalla LCD	16X2	USD 5.79
Potenciómetro	10K	USD 1
Potenciómetro	5K	USD 1
Resistencia	220Ω	USD 0.03
Resistencia	10kΩ	USD 0.09
Fotorresistencia	3mm LDR	USD 1
Cables Dupont	Macho/Hembra	USD 1
Cables Dupont	Macho/Macho	USD 1.49
LED	Verde, rojo, azul, UV (mini money detector).	USD 0.15
Power Bank	30000 mAh	USD 10
Cubierta del sistema	Caja plástica oscura plástico 5L	USD 4
	<b>Total</b>	<b>USD 38.55</b>

Los materiales utilizados para el desarrollo del sistema se detallan en la Tabla 1 y fueron suministrados por el autor. Todos los materiales fueron adquiridos en tiendas electrónicas no especializadas. El diseño del sistema se detalla en la Figura 1 y el código de programación aplicado se detalla en la Tabla 2. La programación del sistema se realizó en el software Arduino IDE versión 2.0.3.

**Tabla 2.** Código de programación del ESPECTRUINO

```

#include <LiquidCrystal.h>
const int rs = 12, en = 11, d4 = 5, d5 = 4, d6 = 3, d7 = 2;
LiquidCrystal lcd(rs, en, d4, d5, d6, d7);
int ldr = 0;
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode(A0, INPUT);
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.setCursor(1, 0);
  lcd.print("Abs=-log(v1/v2)");
}
void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  ldr = analogRead(A0);
  ldr = (ldr/1);
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("v1");
  lcd.setCursor(6, 1);
  lcd.print(ldr);
  delay(1000);
}

```

Las dimensiones del diseño de los portamuestras utilizados se detallan en la Figura 2. Dichos materiales se hicieron con madera de 3 mm de espesor mediante corte láser para acoplar las piezas. Los portamuestras fueron diseñados para la utilización de celdas de paso de luz de 1 cm.

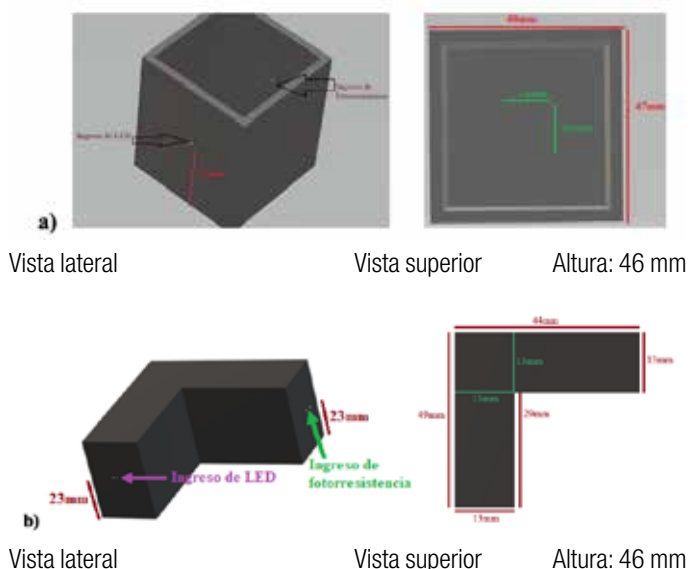


Figura 2. a) Portamuestras para análisis de absorbancia y turbidez; b) Portamuestras para análisis de fluorescencia

Las pruebas de desempeño químico del sistema diseñado se desarrollaron de la siguiente manera:

- **Pruebas de análisis de absorbancia:** Se realizaron curvas de calibración con soluciones coloreadas, como el azul de metileno ( $0.5 \cdot 10^{-4}$  M a  $3 \cdot 10^{-4}$  M) y permanganato de potasio ( $0.5 \cdot 10^{-5}$  M a  $4 \cdot 10^{-5}$  M). Las soluciones se prepararon a partir de reactivos sólidos marca Merck y agua destilada tipo II. Para las medidas de azul de metileno se utilizó un led rojo, mientras que para las medidas de permanganato se usó un led verde. Adicionalmente, se utilizó el método de las variaciones continuas para examinar su aplicabilidad en el ámbito de la química de coordinación.

Para llevar a cabo este proceso, se prepararon dos disoluciones a partir de reactivos sólidos marca JT Baker y agua destilada tipo II: la primera de sulfato de amonio y hierro (II) 0.01M (Solución A), y la segunda de 1,10-fenantrolina 0.01M (Solución B). Ambas soluciones se mezclaron en diversas proporciones, dando lugar al complejo catiónico tris (1,10-fenantrolina) hierro (II). Para estas medidas, se utilizó como fuente un led blanco y se compararon los resultados con un espectrofotómetro Fisher Scientific SP-2100UVP. Para todas las medidas se utilizó el portamuestras detallado en la Figura 2a. La medida de la absorbancia se calculó aplicando la ecuación 1, donde  $v_1$  corresponde al voltaje de la fotorresistencia (en milivoltios) de las soluciones problema y  $v_2$  a al voltaje de la fotorresistencia (en milivoltios) del blanco:

$$A = -\log(v_1/v_2) \quad (1)$$

**Pruebas de análisis de fluorescencia:** Se realizó curva de calibración con fluoresceína sólida marca Sigma Aldrich (entre 3000 y 20000 ppb). La función respuesta corresponde al voltaje generado por la fotorresistencia. El portamuestras utilizado se indica en la Figura 2b. El haz de excitación corresponde a un led que emite radiación UV.

**Pruebas de análisis de turbidez:** Para la medida de la turbidez se prepararon soluciones de AgCl (entre 10 y 50ppm) mezclando soluciones de AgNO<sub>3</sub> (3500ppm) y KCl (100ppm). Estas últimas se prepararon a partir de reactivos sólidos marca Sigma Aldrich y agua destilada tipo 2. Las medidas se realizaron usando un led rojo y el portamuestras indicado en la Figura 2a. Las medidas se compararon con el equipo TB1 marca Velp Científica. Para el cálculo de la atenuación de la luz (A) se aplicó la ecuación 1, donde  $v_1$  corresponde al voltaje de la fotorresistencia (en milivoltios) de las soluciones problema y  $v_2$  a al voltaje de la fotorresistencia (en milivoltios) del blanco. Una vez obtenida la atenuación, se calculó la turbidez en NTU usando la ecuación 2 obtenida mediante comparaciones de estándares de formazina en medidas del turbidímetro comercial y el ESPECTRUINO.

$$T = 195915 \cdot A^2 - 13422 \cdot A + 310.21 \quad (2)$$

Como recomendación en la aplicación química, es esencial preparar las soluciones de cloruro de plata con rapidez. Estas soluciones tienden a descomponerse, lo que afecta a la obtención de la linealidad.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Aspectos generales del desarrollo del equipo

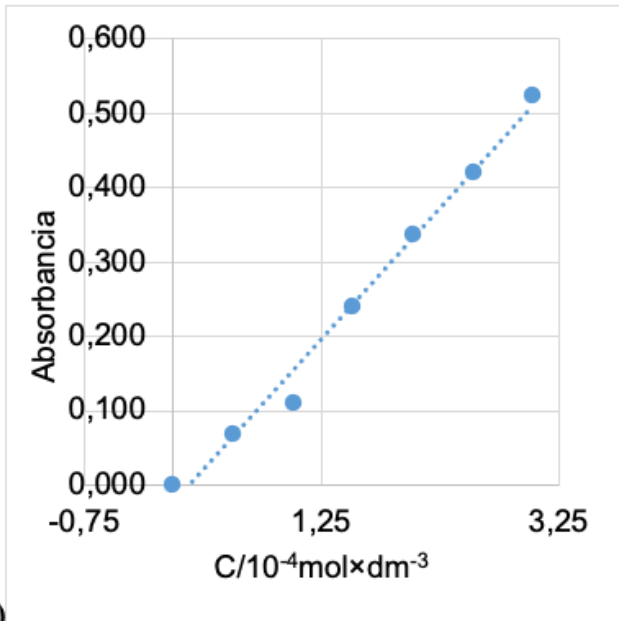
El diseño de ESPECTRUINO y la programación del sistema no requirió grandes habilidades de programación ni microelectrónica, ya que el sistema es totalmente desarmable y reajutable para configuraciones adicionales. Como se muestra en la Tabla 1, el costo de los componentes no supera los 38.55 USD, mientras que los sistemas individuales de análisis de absorción, fluorescencia y turbidez superan los 500 USD en plataformas como Alibaba o eBay. El objetivo de este trabajo no es generar este producto en masa, en cuyo caso los costos de adquisición de los componentes serían aun menores; por el contrario, este estudio abre la posibilidad de diseñar el producto en las aulas de enseñanza de química instrumental.

### Pruebas de análisis de absorbancia

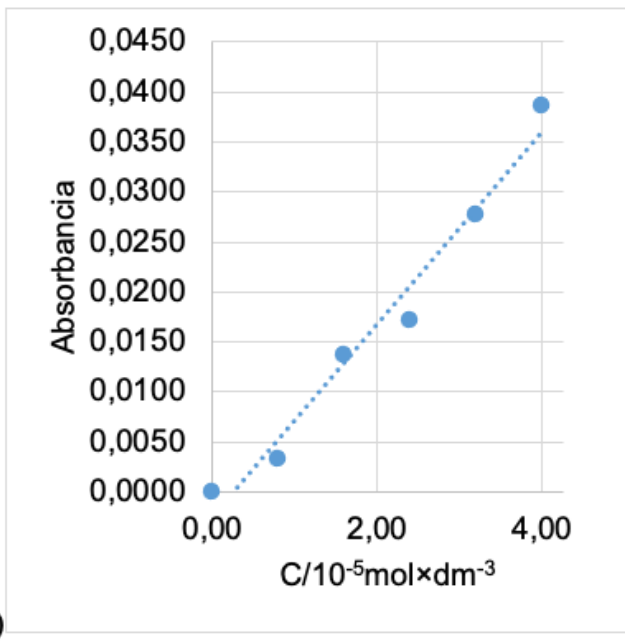
Las pruebas de linealidad de absorbancia realizadas con el azul de metileno (Figura 3a) y el KMNO<sub>4</sub> (Figura 3b) medidos con ESPECTRUINO

arrojan los estadísticos detallados en la Tabla 3. Las curvas de calibración utilizando azul de metileno y permanganato de potasio han demostrado la capacidad de este equipo para medir con precisión las concentraciones de diferentes analitos. Los coeficientes de correlación obtenidos en estas curvas (Tabla 3) indican una fuerte relación lineal entre la concentración y la absorbancia, lo que valida la eficacia del fotómetro en la cuantificación.

La determinación del método de variaciones continuas se ejecutó con el fin de comprobar la relación metal-ligando del complejo catiónico tris (1,10-fenantrolina) hierro (II) haciendo mediciones tanto con un fotómetro comercial como con ESPECTRUINO, y se detalla en la Figura 4.



a)



b)

Figura 3. Curva de calibración obtenida con ESPECTRUINO con a) azul de metileno y b) permanganato de potasio

Tabla 3. Datos de linealidad de las curvas de calibración obtenidas

Parámetro	Azul de metileno	KMnO <sub>4</sub>	
Absortividad molar (cm <sup>-1</sup> M <sup>-1</sup> ) m	1764	961	
R <sup>2</sup>	0.988	0.973	
Desviación estándar de la correlación Sy/x	2.33×10 <sup>-2</sup>	2.70×10 <sup>-3</sup>	
	$\frac{10 \cdot s_y}{x}$	1.31×10 <sup>-4</sup>	2.81×10 <sup>-5</sup>
Límite de cuantificación (M)			

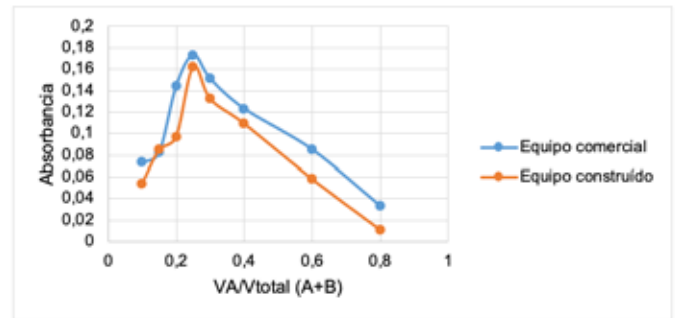


Figura 4. Método de variaciones continuas para el análisis de la composición de complejo entre la 1,10-fenantrolina y el hierro 2. Se mezclaron soluciones de sulfato de amonio y hierro (II) 0,01M (Solución A) y 1,10-fenantrolina 0,01M (Solución B)

La adopción del método de las variaciones continuas para evaluar la aplicabilidad del fotómetro en la química de coordinación añade un nivel adicional de rigor científico a la discusión. Al comparar los datos generados por ESPECTRUINO con los datos de un fotómetro comercial (Figura 4), se pudo verificar la precisión y la coherencia de los resultados obtenidos, que permiten deducir que el complejo está formado por tres unidades de ligando y una de metal. La comparación entre valores medidos con un equipo comercial y el sistema desarrollado en este estudio revela la concordancia entre ambos conjuntos de datos y fortalece la validez del enfoque propuesto. Sin embargo, al aplicar la prueba tstudent para muestras emparejadas de los datos de la Figura 4, se obtuvo un tcalculado de 3.86 frente a un tcrítico de 2.84 para siete grados de libertad, dando como conclusión que ambos equipos arrojan datos estadísticamente distintos. Una de las causas de esta diferencia es que en el ESPECTRUINO se empleó un led blanco como fuente luminosa, mientras que en el espectrofotómetro se tomaron las lecturas con una longitud de onda de 508 nm.

Tabla 4. Datos de linealidad de la curva de calibración obtenida

Parámetro	Fluoresceína
Sensibilidad (μV ppb <sup>-1</sup> ) m	0.0033
R <sup>2</sup>	0.944
Desviación estándar de la correlación (μV) Sy/x	6.86
Límite de cuantificación (ppb)	20777

$$LC = \frac{10 \cdot s_y}{m}$$

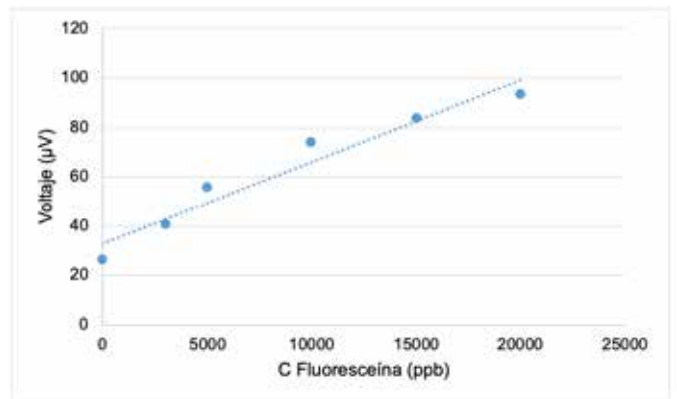


Figura 5. Curva de calibración de fluorescencia obtenida con ESPECTRUINO

## Pruebas de análisis de fluorescencia

Las pruebas de linealidad de fluorescencia realizadas con fluoresceína (Figura 5) generan los estadísticos detallados en la Tabla 4.

El análisis estadístico nos indica que la respuesta de la fotorresistencia (mV) tiene una correlación lineal con la concentración de fluoresceína ( $R^2 = 0.944$ ). A medida que las concentraciones de fluoresceína aumentan, se va perdiendo linealidad entre la función respuesta y la concentración. El valor máximo en el que se estabiliza la función respuesta se da por un efecto llamado absorción primaria (Skoog et al., 2014); por ello, para que la linealidad se mantenga y se pueda analizar la fluorescencia mediante la ecuación de una recta, las disoluciones deben ser diluidas (menor a 20000 ppb). El equipo nos permite obtener valores confiables para poder entender el fenómeno de fluorescencia.

## Pruebas de análisis de turbidez

Las pruebas de linealidad de turbidez realizadas con AgCl (Figura 6) generan los estadísticos detallados en la Tabla 5.

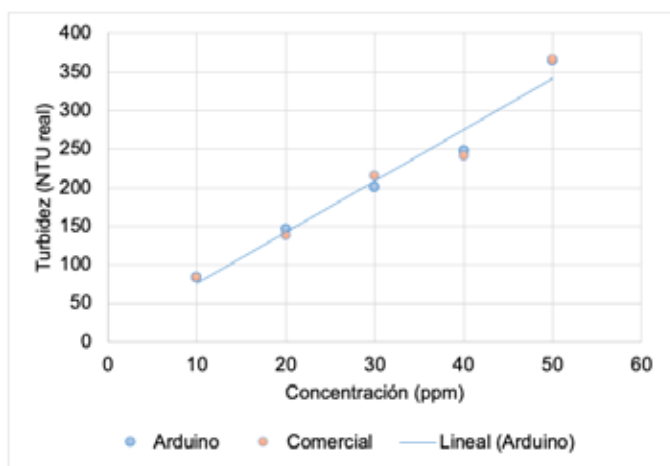


Figura 6. Curva de calibración de turbidez obtenida con ESPECTRUINO y con el equipo comercial

Tabla 5. Datos de linealidad de la curva de calibración obtenida

Parámetro	AgCl
Sensibilidad (NTU ppm <sup>-1</sup> )	6.66
R <sup>2</sup>	0.967
Desviación estándar de la correlación (NTU) Sy/x	21.86
Límite de cuantificación (ppm)	32.83

Se observa linealidad entre los valores de turbidez y concentración de AgCl. Al aplicar la prueba *tstudent* para muestras emparejadas del análisis realizado en la Figura 6, se obtuvo un *tcalculado* de 0.05 frente a un *tcrítico* de 3.49 para cuatro grados de libertad, dando como conclusión que ambos equipos arrojan datos estadísticamente iguales para este parámetro. Al analizar parámetros de rendimiento en relación con estudios previos, como el presentado por Román et al. (2016), se identifica un dispositivo diseñado para medir la turbidez y se encontró un error del 3.3 %. Las diferencias obtenidas entre el equipo comercial y el ESPECTRUINO se deben a que el turbidímetro TB1 portable analiza la turbidez con longitud de onda de 850 nm proveniente de un diodo que emite luz infrarroja, mientras que ESPECTRUINO empleó un haz de

luz led de color rojo, considerando que la utilización de longitudes de onda de 780 a 1000 nm hace posible obtener una respuesta más fuerte incluso para diámetros de partículas mayores a 1  $\mu\text{m}$ , lo cual es muy útil en aplicaciones prácticas (Postolache et al., 2002).

## Encuesta de percepción de estudiantes en el uso de ABR

Con el fin de establecer la percepción de los estudiantes (29) sobre el método de aprendizaje, se aplicó una encuesta de 10 preguntas organizadas como se muestra en la Tabla 5. Los estudiantes de la carrera de Química que participaron en la encuesta habían pasado previamente por un proceso de formación básica principalmente mediante un método conductista, en el que el aprendizaje se enfoca en habilidades duras; sin embargo, existían deficiencias en la solución de problemas, como se evidencia en las preguntas 2, 4 y 5. Por el contrario, la aplicación del ABR promueve el desarrollo de habilidades blandas, tales como el trabajo en equipo y la solución de problemas, así como habilidades organizativas, lo cual, a opinión de los estudiantes, potencia el proceso de aprendizaje y la adquisición de nuevos saberes mediante la investigación independiente. El proceso de aprendizaje mediante esta metodología requiere de más trabajo autónomo por parte del estudiante en comparación con el método conductista, por lo que se sugiere que existan proyectos integradores con diversas materias de un mismo nivel académico con el fin de que se abarquen más contenidos.

## CONCLUSIONES

En este estudio, se abordó el desafío de diseñar un sistema de medición simultáneo de fenómenos de absorción, fluorescencia y dispersión de luz basado en la plataforma Arduino® y que tuviese un costo asequible. A través de la implementación de componentes electrónicos sencillos y programación básica, se demostró que es posible crear un instrumento funcional capaz de cuantificar los fenómenos de manera precisa y eficaz. Las absorbancias y medidas de turbidez realizadas por equipos comerciales y ESPECTRUINO no son idénticas debido a las diferencias en las fuentes luminosas; sin embargo, esta discrepancia no compromete la validez de los hallazgos.

El enfoque de diseño asequible utilizando componentes electrónicos simples y la plataforma Arduino® demuestra la viabilidad para construir equipos científicos funcionales con recursos limitados. La posibilidad de replicar instrumentos científicos sofisticados con tecnología de bajo costo amplía el acceso a herramientas analíticas de alta calidad en entornos con restricciones económicas. No obstante, es necesario realizar pruebas más exhaustivas para demostrar estadísticamente la robustez del sistema diseñado.

La aplicación del ABR promovió el desarrollo de habilidades como el trabajo en equipo y la solución de problemas, así como habilidades organizativas, lo cual, a opinión de los estudiantes, permite potenciar el proceso de aprendizaje y la adquisición de nuevos saberes mediante la investigación independiente.

**Agradecimientos:** A los estudiantes de la materia de Métodos Espectroscópicos 1 promoción 2023-1 de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Central del Ecuador que participaron en el desarrollo y diseño de los prototipos expuestos.

**Fuente de financiamiento:** Esta investigación no recibió financiamiento externo.

**Tabla 6.** Encuesta sobre la aplicación del ABR

Pregunta	Resultados
1. ¿El método de enseñanza que su maestro aplica ayuda a potenciar el proceso de aprendizaje?	<p>Si: 28 No: 0</p>
2. ¿Ud. tiene problemas para razonar y ser competente en la construcción de los nuevos conocimientos?	<p>Siempre: 0 Casi siempre: 5 A veces: 18 Nunca: 5</p>
3. ¿Su maestro utiliza técnicas activas para fortalecer la construcción de los conocimientos?	<p>Siempre: 14 Casi siempre: 13 A veces: 2 Nunca: 0</p>
4. ¿Ud. es capaz de razonar y solucionar problemas en su vida diaria?	<p>Siempre: 7 Casi siempre: 20 A veces: 2 Nunca: 0</p>
5. ¿Ud. aplica razonamiento, habilidades y destrezas en la solución de problemas?	<p>Siempre: 12 Casi siempre: 14 A veces: 3 Nunca: 0</p>
6. ¿Ud. considera que el conocimiento adquirido es significativo?	<p>Si: 28 No: 0</p>
7. ¿Con el método que utiliza su maestro adquiere nuevos saberes?	<p>Si: 28 No: 1</p>
8. ¿Los aprendizajes por usted adquiridos son sustentables y sostenibles?	<p>Si: 27 No: 2</p>
9. ¿La aplicación de nuevas técnicas de enseñanza permitirá potenciar el aprendizaje?	<p>Siempre: 21 Casi siempre: 8 A veces: 0 Nunca: 0</p>
10. ¿Mediante el aprendizaje basado en problemas el proceso de inter-aprendizaje es activo?	<p>Siempre: 17 Casi siempre: 11 A veces: 1 Nunca: 0</p>

**Conflicto de intereses:** El autor declara no tener ningún conflicto de intereses. Los patrocinadores no tuvieron ningún papel en el diseño del estudio, la recopilación, el análisis e interpretación de datos, la redacción del documento o en la decisión de publicar los resultados.

## REFERENCIAS

- Abdul, A., Abdul, A. y Mohd, N. (2022). Development of a Portable Spectrophotometer Employing Arduino Microcontroller System for Pollutant Analysis. *Proceedings of Science and Mathematics*, 6.
- Grinias, J. P., Whitfield, J. T., Guetschow, E. D. y Kennedy, R. T. (2016). An Inexpensive, Open-Source USB Arduino Data Acquisition Device for Chemical Instrumentation. *Journal of Chemical Education*, 93 (7), 1316–1319. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.6b00262>
- Kubínová, Š. y Šlégr, J. (2015). ChemDuino: Adapting Arduino for Low-Cost Chemical Measurements in Lecture and Laboratory. *Journal of Chemical Education*, 92 (10), 1751–1753. <https://doi.org/10.1021/ed5008102>
- Lledó, E. (2012). *Diseño de un sistema de control domótico basado en la plataforma Arduino*. Universitat Politècnica de València.
- Postolache, O., Girao, P., Pereira, M. y Ramos, H. (n.d.). An IR turbidity sensor: design and application [virtual instrument]. *IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No.00CH37276)*, 1, 535–539. <https://doi.org/10.1109/IMTC.2002.1006899>
- Román, C., Segura, L., Loza, D. y Dabirian, R. (2016). Construction of an Open Source Based Low Cost. *ITECKNE Innovación en Investigación en Ingeniería*, 13, 17–22. <http://www.scielo.org.co/pdf/itec/v13n1/v13n1a03.pdf>
- Sánchez, E., Inzunza, S. y Ramírez, G. (2014). *Probabilidad y Estadística II*. Grupo Editorial Patria.

- 
- Sandoval, M. J., Mandolesi, M. E. y Cura, R. O. (2013). Teaching Strategies to Teach Chemistry in Higher Education. *Educación y Educadores*, 16 (1), 126–138. <https://doi.org/10.5294/edu.2013.16.1.8>
- Skoog, D., West, D., Holler, J. y Crouch, S. (2014). *Fundamentos de Química Analítica*. CENGAGE Learning.