

Desarrollo de un prototipo de fotocolorímetro didáctico lector de microplacas basado en tecnologías de código abierto



Colaboración

Arturo Cabrera Vazquez; Eduardo Enrique Salazar; Juan Pablo Salazar; Ruben Enrique Cuevas Alarcon, Arturo Cabrera Hernández, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior Misantla.

Fecha de recepción: 01 de mayo de 2025

Fecha de aceptación: 12 de septiembre de 2025

RESUMEN: Frente a la limitación de recursos en instituciones de educación superior, donde la falta de equipos especializados restringe la formación práctica, se plantea el diseño y construcción de un fotocolorímetro didáctico lector de microplacas (FDLM) como una alternativa viable para la enseñanza de principios básicos de espectrofotometría. El objetivo del proyecto fue desarrollar un equipo de bajo costo, elaborado con materiales accesibles y tecnologías de código abierto, que permita a los estudiantes la adquisición de habilidades experimentales sin depender de equipos comerciales de alto presupuesto. El FDLM se diseñó en cuatro etapas: (i) desarrollo del sistema óptico basado en un LED para la cuantificación de absorbancia, (ii) construcción del sistema mecánico mediante motores a pasos y un mecanismo de cremallera y correa, (iii) programación del software que coordina el movimiento X-Y de la microplaca con la fuente de luz y el sensor, y (iv) validación del prototipo mediante un análisis comparativo frente a un espectrofotómetro comercial. Los resultados obtenidos presentan un comportamiento lineal confiable dentro de un rango operativo limitado, con sensibilidad adecuada para fines didácticos y pedagógicamente eficaz bajo un enfoque constructivista.

PALABRAS CLAVE: Fotocolorímetro, microplaca, herramienta didáctica, autoconstrucción, arduino.

ABSTRACT: Faced with resource limitations in higher education institutions, where the lack of specialized equipment restricts practical training, the design and construction of a didactic microplate reader photocalorimeter (FDLM) is proposed as a viable alternative for teaching basic principles of spectrophotometry. The objective of the project was to develop a low-cost device, made with accessible materials and open source technologies, that allows students to acquire experimental skills without depending on high-budget commercial equipment. The FDLM was designed in four stages: (i) development of the LED-based optical system for absorbance quantification; (ii) construction of the mechanical system using stepper motors and a rack and belt mechanism; (iii) programming of the software that coordinates the X-Y movement of the microplate with the light source and the sensor; and (iv) validation of the prototype through a comparative analysis against a commercial spectrophotometer. The results obtained present reliable linear behavior within a limited operating range, with adequate sensitivity for teaching purposes and pedagogically effective under a constructivist approach.

KEYWORDS: Photocalorimeter, microplate, educational tool, self-construction, Arduino.

INTRODUCCIÓN

Los lectores de microplacas tipo ELISA, son instrumentos de laboratorio diseñados para cuantificar eventos biológicos, químicos y físicos en pequeños volúmenes de soluciones contenidas en los pocillos de placas de microtitulación con un formato de automatización y alto rendimiento [1], con amplia aplicación en áreas tan diversas como endocrinología, biología celular, inmunología y desarrollo de fármacos [2], viabilidad y crecimiento de microorganismos en diferentes condiciones experimentales [3].

Su arquitectura se sustenta en tres sistemas principales que actúan de manera integrada. El sistema óptico, compuesto por

fuentes de luz, como lámparas de xenón o LEDs, monocromadores además de detectores tales como fotodiodos o tubos fotomultiplicadores, lo cual permite excitar las muestras en longitudes de onda específicas y medir señales ópticas resultantes de procesos analíticos, tales como absorbancia, fluorescencia o luminiscencia, garantizando sensibilidad y especificidad [4]. El sistema mecánico asegura el desplazamiento preciso de la microplaca mediante motores y mecanismos de alineación, de modo que cada pocillo se posicione correctamente frente al haz óptico. Finalmente, el sistema informático de procesamiento de datos controla el instrumento, digitaliza las señales luminosas convertidas en impulsos eléctricos, y aplica algoritmos de análisis para transformar la información en resultados cuantitativos confiables y exportables. La interacción coordinada de estos sistemas no solo garantiza la exactitud y reproducibilidad de los ensayos, sino que también optimiza el tiempo experimental y el uso de reactivos, lo que convierte al lector de microplacas en una herramienta indispensable en investigación biomédica, farmacéutica, ambiental, alimentaria y en la industria cosmética [5].

Actualmente, la disponibilidad de lectores de microplacas automatizados se ofertan por un creciente número de fabricantes en diversas configuraciones y han ganado amplia aceptación en la comunidad científica e industrial. No obstante, la adquisición de estos equipos así como el de sus consumibles puede resultar costosa y fuera del presupuesto para muchas instituciones educativas [6]. Como alternativa, la construcción de prototipos con componentes asequibles y utilizando plataformas de acceso libre y código abierto emerge como una opción viable [7].

Estudios previos han desarrollado dos enfoques para crear alternativas de bajo costo a los lectores de microplacas comerciales [8,9], el primero se basa en diseños donde la cámara de teléfonos inteligentes funcionan como sensor óptico de un smartphone y con accesorios impresos en 3D, se ordenan para medir la luz transmitida a través de las muestras líquidas. Como fuente luminosa se ha empleado una matriz de LED o fibras ópticas individuales para analizar pruebas ELISA en muestras biológicas [8,9]. El segundo enfoque se basa en la tecnología convencional de un lector de microplacas empleando materiales genéricos y programación en código abierto, reduciendo significativamente el costo por unidad [10,11].

En el presente artículo se propuso la integración de equipos multidisciplinarios en el área biológica, mecánica e informática para el diseño y la construcción de un equipo de bajo costo empleando la arquitectura convencional, con un lector de absor-

banza para microplacas y empleando un sistema CNC construido de materiales de reciclado, coordinados con una plataforma libre de código abierto Arduino a fin de disminuir el costo del equipo y establecer un esquema didáctico durante su construcción y operación.

MATERIAL Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Investigación Avanzada de Veracruz (LIAV) dentro del Instituto Tecnológico Superior de Misantla (ITSM), Veracruz, México. De manera similar a los equipos convencionales, el prototipo incluyó la construcción de tres sistemas: óptico, mecánico y electrónico.

Sistema óptico: El sistema está construido por una fuente de luz y un fotodetector, que se ha fijado y alineado para que la luz pueda pasar a través de la muestra. La fuente de luz es un led ultrabrillante de color verde marca LED-TECH.DE optoelectronics, parte número LT-0697, 3mm de diámetro, con un máximo de emisión de 525 nm e intensidad luminosa máxima de 20000 milicandelas y un voltaje máximo de 4 V de corriente directa [12]. Se seleccionó esta fuente de luz debido a su bajo costo, consumo mínimo de electricidad, alta luminosidad, configuración flexible, pureza espectral alta, tamaño pequeño y generación mínima de calor, ideal para aplicaciones optoelectrónicas.

El detector para convertir la luz transmitida en señal eléctrica es una fotoresistencia marca CEBEK®, modelo C-2795 con un valor máximo de potencia disipable de 90 mW [13], la cual responde a los cambios en la intensidad de la luz modificando el valor de su resistencia. Cuanto mayor sea la intensidad de luz a la longitud de onda de trabajo, más baja será la resistencia al paso de corriente. La señal generada por la luz transmitida se dirigió para su procesamiento y digitalización a un controlador Arduino mega R32560 [14].

Sistema mecánico: Consta de un sistema de control numérico por computadora (CNC), el cual se obtuvo a partir de impresoras en desuso las cuales contienen elementos mecánicos útiles con la precisión y suavidad que se requiere para controlar en todo momento la posición de un punto sobre la placa respecto a un origen (0,0,0 de máquina) con alta precisión, en un sistema de coordenadas X-Y. Figura 1.

El motor empleado en el eje X es un motor a pasos bipolar M35SP-11NK, marca Mitsumi, delgado, de alta resolución y estabilidad, con un ángulo de paso de 3.75° y una alimentación de 12 Volts y 200 mA.

Para el eje "Y" el motor empleado es el modelo PM42L-048-HHC9, marca NMB-MAT, alimentado

con 24V, 600mA y un ángulo de paso de 7.5°; este motor cuenta con un sistema de cuatro engranes que permiten una reducción de velocidad de 8 a 1 en el engrane de la banda dentada.

Los ejes de la máquina son movidos por cremalleras y correa que son impulsados por los motores a paso bipolares. Las señales del controlador son amplificadas por los drivers, los cuales son suficientemente potentes para hacer funcionar los motores. El sistema de transporte descrito esta unido a una charola portaplaca.

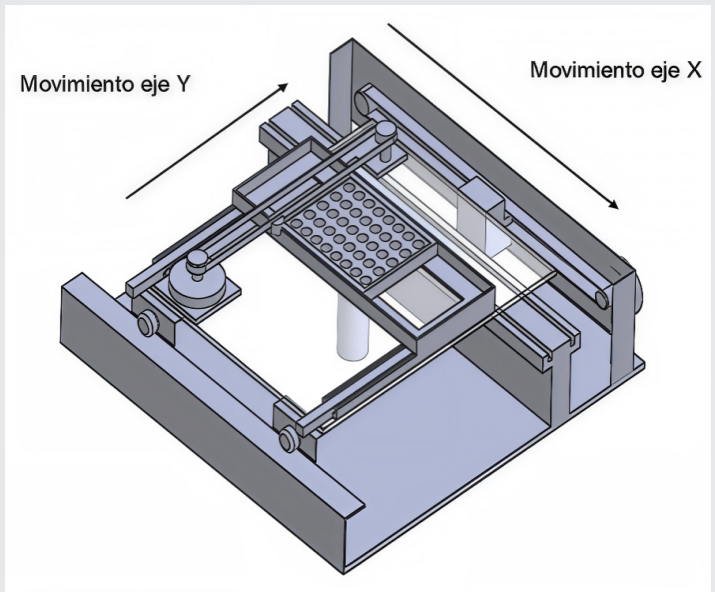


Figura 1. Diagrama mecánico del Fotocolorímetro didáctico lector de microplacas. En la figura se observa los movimientos sobre el eje X y sobre el eje Y del sistema mecánico para posicionar el portaplacas con referencia a un origen 0,0,0 de la máquina. Fuente: Elaboración propia.

Sistema electrónico: Emplea como eje central la plataforma de prototipos electrónica de código abierto, basada en el microcontrolador Atmega 168, Arduino Mega 2560, como se observa en la Figura 2, la cual es una plataforma de bajo costo y fácilmente programable en lenguaje C/C++[14].

Para programar la placa Arduino, el software empleado fue Arduino IDE, el cual es de acceso libre y código abierto. La programación se desarrollo en un ambiente de Windows y permitió sincronizar el tiempo de emisión de color por el led con la cantidad de luz transmitida capturada por el sensor, así como su conversión a señal digital para ser transmitida y visualizada en una computadora personal. El software desarrollado empleó el lenguaje Arduino processing y Arduino IDE [14].

Ensamblaje y construcción del Fotocolorímetro

La cubierta externa se construyo con madera de 1 cm de espesor y dimensiones de 40 x 21 cm con una altura de 12 cm.

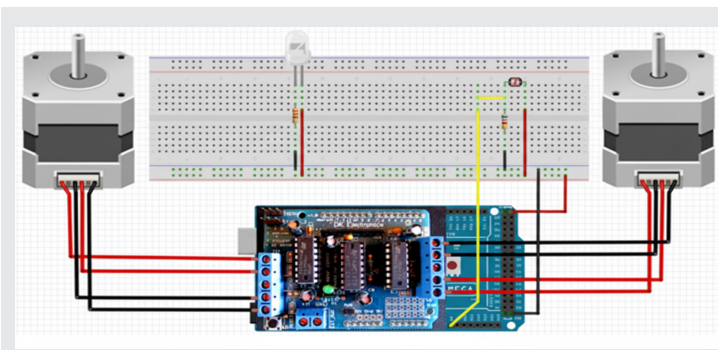


Figura 2. Diagrama esquemático de los componentes de control del sistema electrónico y mecánico del FDLM. Se presentan las conexiones del Arduino Mega 2560, Shield L293D a los motores a paso bipolares, el LED verde y la LDR (fotoresistencia). Fuente: Elaboración propia.

A fin de disminuir el reflejo interno de la luz, el interior del equipo se cubrió con pintura negra mate. En su parte interna el fotocolorímetro se construyo bajo el siguiente esquema de trabajo:

1. Se montó un LED ultrabrillante verde sobre una base de madera, posicionado a 2.5 cm de la superficie de la placa. Para evitar la dispersión lateral de la luz y asegurar una trayectoria paralela a la superficie, el LED se colocó dentro de un tubo con un diámetro ligeramente superior. La alta intensidad luminosa del LED seleccionado garantiza una relación señal/ruido óptima para las mediciones. Este punto se definio como el punto de referencia 0,0,0 del equipo.

2. El diseño del equipo priorizó la precisión en el manejo de la microplaca, implementando un sistema mecánico robusto basado en motores a pasos bipolares y un mecanismo de cremallera y correa. El sistema mecánico se compone de dos módulos de movimiento, uno en el eje "X" y otro en el eje "Y", ambos controlados por motores a pasos. El módulo de movimiento en "X", con una carrera de 32 cm, desplaza una plataforma que sujeta la microplaca, mientras que el módulo de movimiento en "Y", con una carrera de 22 cm, se desplaza sobre la plataforma del módulo "X", permitiendo el posicionamiento en el plano "XY". La meticulosa fijación de los motores y el ajuste preciso del sistema de transmisión permitieron un control bidimensional del desplazamiento. El sistema Arduino, actuando como el cerebro del equipo, coordinó los movimientos de los motores con una resolución fina, garantizando el posicionamiento preciso de cada uno de los 40 pocillos de la microplaca respecto al pocillo de origen. Esta capacidad de posicionamiento preciso fue esencial para asegurar la repetibilidad y la confiabilidad de las mediciones, minimizando errores y optimizando la eficiencia del proceso [15].

3. Se colocó un detector de luz a 2 cm por encima de un LED verde ultrabrillante, de manera que estuviera alineado con la trayectoria lineal del haz de luz que atraviesa la muestra en cada pocillo de la microplaca.

El eje central del fotosensor se ajustó para coincidir exactamente con el haz de luz proveniente de la muestra [16]. Las terminales del detector se conectaron a las entradas correspondientes del módulo Arduino, como se observa en la Figura 3.

El circuito electrónico, cuyo componente principal fue el módulo Arduino, permitió la sincronización del encendido del LED, el posicionamiento del pocillo para la lectura y la toma de datos por el detector. Para el diseño del sistema controlador del movimiento "XY" de la microplaca se elaboró una aplicación empleando el programa arduino processing, además se elaboró una segunda aplicación para captura, procesamiento y visualización de datos empleando el programa arduino IDE [15].

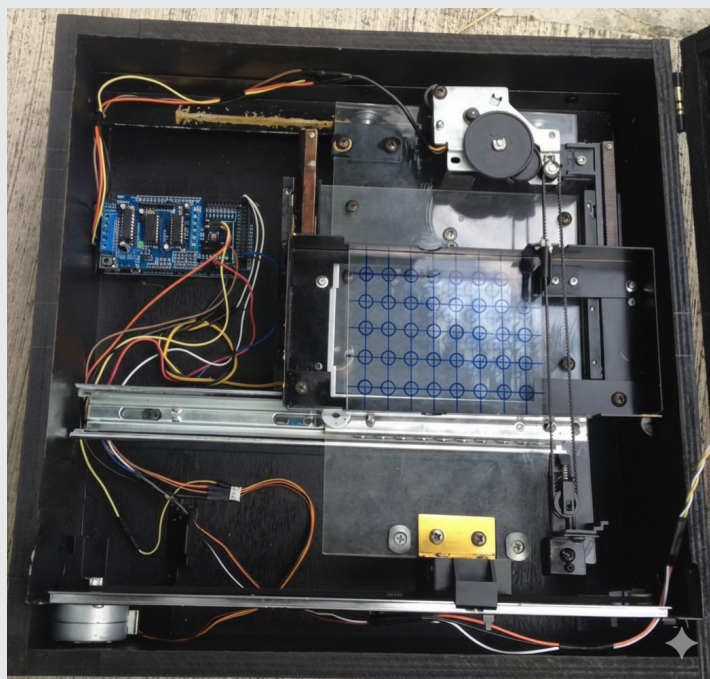


Figura 3. Vista superior de la parte interna del FDLM. Se observan los módulos de movimiento en el eje X, en el eje Y, el elemento Arduino así como la plataforma que sujeta la microplaca. Fuente: Elaboración propia.

Microplaca de teflón: Dado el alto costo de las microplacas comerciales se propuso la búsqueda de alternativas que permitieran crear microplacas reutilizables Figura 4. Las microplacas empleadas con este prototipo fueron construidas de teflón (politetrafluoroetileno), un polímero similar al polietileno en los que los átomos de hidrógeno han sido substituidos por átomos de Flúor. Teflon es una marca comercial registrada por DuPont, con propiedades inertes y antiadherentes, bajo coeficiente de rozamiento y gran impermeabilidad, es flexible y soporta temperaturas entre -270 y 270 grados centígrados, lo cual permite su esterilización [17].

Además de estas propiedades, la facilidad para trabajarse mecánicamente apoyaron su empleo como material base en la elaboración de microplacas reutilizables

y esterilizables. Placas de 10 por 15 cm y un espesor de 1 cm fueron perforadas con 40 pozos de 1 cm de diámetro empleando una fresadora comercial. La tapa de las placas de teflon se elaboró con vidrio comercial.

Validación del Fotocolorímetro didáctico lector de microplacas (FDLM)

La validación del FDLM se efectuó empleando como modelo de trabajo la dilución seriada de colorantes vegetales grado alimenticio rojo grosella 270, marca De-mian.

La curva de calibración se construyó diluyendo una solución acuosa concentrada de 2 mg/ml para obtener valores de 1.8, 1.6, 1.4, 1.2, 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.15, 0.10 y 0.05 mg/ml. Cada solución de la curva de calibración se leyó por triplicado en el FDLM y en forma paralela en un espectrofotómetro comercial UV-VIS Thermo Scientific™ GENESYS 10S en una cubeta de plástico de 1 cm de paso de luz empleando agua como blanco de reactivos. Los valores de absorbancia se recopilaron en hojas de cálculo del programa excel.

Análisis estadístico de datos

El análisis de datos y la representación gráfica se realizaron utilizando el programa Microsoft Office Excel 2007. Se elaboró un gráfico de dispersión, colocando la concentración de los estándares en el eje "X" y la absorbancia en el eje "Y". Posteriormente, se aplicó un análisis de regresión lineal para determinar la ecuación de la recta que mejor se ajusta a los datos ($y = mx + b$).

La calidad del ajuste se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2), donde valores cercanos a 1 indican un ajuste óptimo con una fuerte correlación entre concentración y absorbancia.

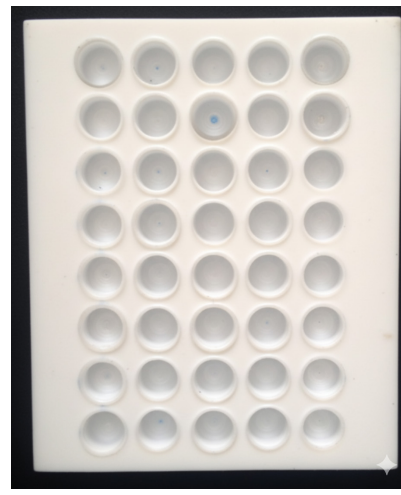


Figura 4. Microplaca de teflon. Se presenta la fotografía de una microplaca de 40 pocillos construida en placa de teflon. Se observan cada uno de los 40 pocillos así como su interior. El fondo es una fina capa delgada de teflon que permite el paso de luz del LED a el detector. Fuente: Elaboración propia.

Validación del fotocolorímetro

Para evaluar la confiabilidad del sistema, se compararon los parámetros de linealidad y precisión del prototipo frente a un espectrofotómetro comercial. Se emplearon diluciones seriadas acuosas del colorante vegetal de grado alimenticio rojo grosella 270, seleccionadas por su baja toxicidad, bajo costo, disponibilidad y estabilidad. Las soluciones se prepararon inmediatamente antes de la medición, registrando su absorbancia. El LED utilizado presentó un espectro de emisión con un máximo a 525 ± 10 nm, correspondiente a la longitud de onda complementaria del pigmento.

Simultáneamente, las mismas muestras se midieron en un espectrofotómetro comercial GENESYS 10S a 525 nm, empleando agua como blanco de reactivos [16]. Los valores de lectura del fotocolorímetro didáctico, en unidades arbitrarias, se convirtieron a absorbancia mediante la fórmula:

$Abs = -\log(\text{lectura de dilución} / \text{lectura de blanco}).$

RESULTADOS

Discusion

El desarrollo del fotocolorímetro didáctico lector de microplacas (FDLM) demostró que es posible construir un dispositivo funcional con componentes de bajo costo y plataformas de código abierto, capaz de realizar mediciones de absorbancia de manera comparable, aunque no equivalente, a un espectrofotómetro comercial. El equipo se puede observar en el siguiente enlace <https://www.youtube.com/watch?v=aoaLlbRBMT4>.

Los resultados obtenidos en la validación experimental evidencian tanto los alcances como las limitaciones del prototipo, lo cual aporta información relevante para su implementación en contextos educativos y de investigación formativa.

La curva de calibración para el color rojo, obtenida con el equipo FDLM se presenta en la Figura 5B, donde se grafica el promedio y la desviación estándar para cada concentración. Se observa un comportamiento lineal dentro de un rango restringido entre 0.1 a 0.3 mg/mL, alcanzando un coeficiente de correlación ($R^2 = 0.9839$) que aunque inferior al del espectrofotómetro GENESYS 10S cuyo valor alcanza un $R^2 = 0.9987$, Figura 5A, se mantiene dentro de valores aceptables para fines docentes [16]. Esta observación coincide con lo reportado en estudios previos sobre dispositivos alternativos de bajo costo, donde se destaca que la linealidad es uno de los parámetros más afectados por la simplicidad de los sistemas ópticos empleados [7,8].

La reducción del rango de trabajo se asocia principalmente a la dispersión espectral del LED, que con un ancho de banda de ± 10 nm no logra una selectividad comparable a la de los monocromadores de equipos comerciales. Esta característica es crítica, ya que la

Ley de Lambert-Beer asume el uso de radiación prácticamente monocromática para mantener la proporcionalidad entre absorbancia y concentración [7].

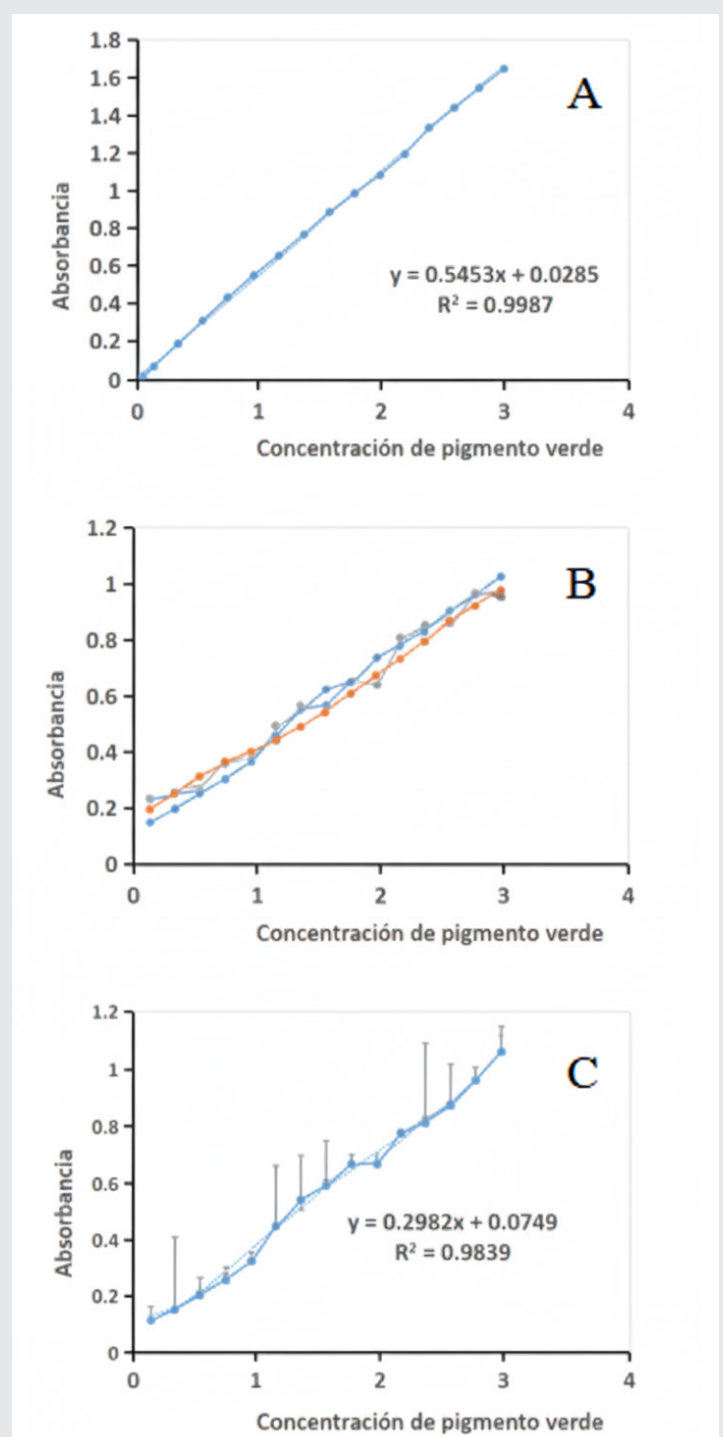


Figura 5. Comportamiento de los datos de absorbancia obtenidos con el equipo comercial GENESYS 10-S (panel A) comparado con los datos obtenidos con el FDLM (panel B). Se presentan la ecuación de la línea de tendencia y el valor de R2 para el equipo comercial GENESYS 10-S y para el intervalo de respuesta lineal del FDLM

Fuente: Elaboración propia.

Otro aspecto a considerar es la reproducibilidad, que resultó limitada en el FDLM debido a variaciones en la

alineación óptica y en la homogeneidad de los pocillos de teflón. Mientras que el espectrofotómetro comercial mostró desviaciones mínimas entre mediciones sucesivas, el FDLM presentó una variabilidad perceptible, reflejada en la mayor desviación estándar de las lecturas. Esta diferencia puede atribuirse a la dispersión interna de la luz ocasionada por materiales no especializados en óptica [11], así como a la ausencia de sistemas de control de calidad en la fabricación de las microplacas, además de la presencia de luz parásita dentro del dispositivo, así como una mayor interferencia y dispersión en la trayectoria del haz luminoso. Sin embargo, esta característica, si bien representa una desventaja para aplicaciones analíticas de alta precisión, no invalida su utilidad en la enseñanza práctica de conceptos fundamentales [17].

Desde el punto de vista de sensibilidad, el FDLM logró detectar variaciones de absorbancia de 0.05 unidades para cambios de 0.2 mg/mL en la concentración de colorante Figura 5C, lo cual confirma que el sistema es capaz de distinguir diferencias cuantitativas en un intervalo limitado. Aunque esta resolución es menor a la de equipos comerciales, resulta suficiente para prácticas educativas enfocadas en la comprensión de la relación entre concentración y absorbancia, en el diseño de curvas de calibración y en la validación experimental de la Ley de Lambert-Beer [9].

Un elemento adicional de interés es la integración de microplacas reutilizables de teflón. Aunque esta propuesta surge como respuesta al alto costo de consumibles comerciales [5], plantea tanto ventajas como retos. Entre sus beneficios destacan la durabilidad, esterilización y reutilización, lo cual reduce significativamente los costos de operación en el ámbito docente. No obstante, las diferencias en uniformidad de los pozos, así como la naturaleza difusora del material, contribuyen a la pérdida de precisión en la medición [17]. Futuras mejoras podrían considerar la incorporación de recubrimientos ópticamente estables o el empleo de plásticos transparentes de grado óptico.

El enfoque interdisciplinario empleado en la construcción del FDLM es otro aspecto destacable. La participación de áreas como biología, mecánica e informática no solo permitió materializar un dispositivo funcional, sino que también enriqueció el proceso formativo de los estudiantes involucrados. Durante su desarrollo fue evidente que la implementación de un sistema CNC con componentes reciclados, combinado con plataformas de libre acceso como Arduino, constituye un modelo didáctico que promueve el aprendizaje integral y fomenta la innovación tecnológica en instituciones con recursos limitados.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman la viabilidad del diseño y construcción de un fotocolorímetro didáctico

de bajo costo (FDLM), que cumple los requerimientos básicos para su aplicación en actividades docentes. El dispositivo presenta limitaciones en términos de reproducibilidad, resolución óptica y precisión en comparación con equipos comerciales, sin embargo demostró un comportamiento lineal confiable dentro de un rango operativo definido, con coeficientes de correlación estadísticamente aceptables para fines educativos. Además, constituye un modelo de innovación tecnológica sostenible que facilita el acceso a equipos de laboratorio en instituciones con recursos limitados.

El FDLM es una herramienta formativa que combina bajo costo, funcionalidad esencial y valor didáctico, promoviendo entornos de aprendizaje activo y experimental en ciencias e ingeniería.

BIBLIOGRAFÍA

[1] *Promega (2025). Microplate Reader & Luminometer Selection Guide. Obtenida el 23 de septiembre del 2025, de la página electrónica <https://worldwide.promega.com/es-es/products/microplate-readers-fluorometers-luminometers/microplate-readers/>.*

[2] *Ackerman, S. B., & Kelley, E. A. (1983). Probe colorimeter for quantitating enzyme-linked immunosorbent assays and other colorimetric assays performed with microplates. Journal of Clinical Microbiology, 17(3), 410-413.*

[3] *O'Neill, H. C., & Parish, C. R. (1983). A rapid, automated colorimetric assay for measuring antibody binding to cell surface antigens. Journal of Immunological Methods, 64(3), 257-268.*

[4] *What Does a Microplate Reader Measure and Other Microplate Q&A (2025). Hudson Lab Automation. Obtenida el 25 de septiembre del 2025, de la página electrónica <https://hudsonlabautomation.com/what-does-a-microplate-reader-measure/>.*

[5] *BMG LABTECH (2025). Microplate reader. Obtenida el 23 de septiembre del 2025, de la página electrónica <https://www.bmg-labtech.com/en/microplate-reader/#basic-info>.*

[6] *Arias, E., Giambruno, C., Morduchowicz, A., & Pineda, B. (2023). El estado de la Educación en América Latina y el Caribe 2023. Banco Interamericano de Desarrollo, División de Educación.*

[7] *Branning Jr, J. M., Faughnan, K. A., Tomson, A. A., Bell, G. J., Isbell, S. M., DeGroot, A., ... & Cash, K. J. (2024). Multifunction fluorescence open source in vivo/in vitro imaging system (openIVIS). PLoS ONE, 19(3), e0299875.*

[8] *Alaruri, S. D., Katzlinger, M., Schinwald, B., Kronberger, G., & Atzler, J. (2013). Deve-*

- lopment of LEDs-based microplate reader for bionalytical assay measurements. *Measurement Science and Technology*, 24(10), 105501.
- [9] Pohanka, M., Keresteš, O., & Žáková, J. (2024). A 3D-Printed Do-It-Yourself ELISA Plate Reader as a Biosensor Tested on TNF α Assay. *Biosensors*, 14(7), 331.
- [10] Thompson, J. E. (2022). Low-cost microplate reader with 3D printed parts for under 500 USD. *Sensors*, 22(9), 3242.
- [11] Thiha, A., & Ibrahim, F. (2015). A colorimetric enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) detection platform for a point-of-care dengue detection system on a lab-on-compact-disc. *Sensors*, 15(5), 11431-11441.
- [12] NOVATRONIC (s.f.). Led 5 mm. Recuperado el 14 de abril del 2025 de https://www.led-tech.de/en/3mm-LEDs_DB-3.pdf.
- [13] CEBEK Componentes y Accesorios (s.f.). Fotorresistencia LDR 4.3 mm x 0.5 mm. Recuperado el 14 de abril del 2025 de <http://www.electan.com/datasheets/cebek/CE-C2795.pdf>.
- [14] Arduino (2016). Arduino MEGA 2560 (USA only) & Genuino MEGA 2560 (outside USA). Consultado el 27 de abril del 2016 en <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>.
- [15] Domínguez, H. E. R., & Sánchez, R. C. (2017). Control de coordenadas en xy de un mecanismo de motores a pasos y un microcontrolador. *Jóvenes en la Ciencia*, 3(2), 2273-2277.
- [16] Kim, J. S., Kim, A. H., Oh, H. B., Goh, B. J., Lee, E. S., Kim, J. S., Jung, G. I., Baek, J. Y., & Jun, J. H. (2015). Simple LED spectrophotometer for analysis of color information. *Bio-medical Materials and Engineering*, 26(1_suppl), S1773-S1780.
- [17] Dhanumalayan, E., & Joshi, G. M. (2018). Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE)—a review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 1, 247-268.
- [18] Rivas, K. A., Lemus, R. C. G., Garduño, A. C., Alvarez, C. R. C., & González, M. A. (2024). Desarrollo y Validación de un Método Analítico por Espectrofotometría UV/Vis para la determinación del porcentaje disuelto de tabletas de paracetamol. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(5), 7713-7727.
- [19] Zhang, Q., Brode, L., Cao, T., & Thompson, J. E. (2017). Learning laboratory chemistry through electronic sensors, a microprocessor, and student enabling software: A preliminary demonstration. *Journal of Chemical Education*, 94(10), 1562-1566.

