



Memorias 2025

ISBN: 978-970-96155-1-7



Memorias del Congreso de la Juventud Científica de Guanajuato 2025

EDITORES

- Dra. Raquel Garza Hernández
- Dr. Fabian Ambriz Vargas

EVALUADORES

- Dra. Sarahi Garcia Carvajal
- Dra. Erika Rodríguez Sevilla
- Dra. Raquel Garza Hernández
- Dr. Fernando Arce Vega
- Dr. Luis Alberto Rodríguez Morales
- Dr. Francisco Morales Morales
- Dr. Fabian Ambriz Vargas

COMITÉ DE ORGANIZACIÓN DEL CONGRESO

- Dra. Raquel Garza Hernández
- Dra. Erika Rodríguez Sevilla
- Dr. Fabian Ambriz Vargas

COMITÉ TÉCNICO DEL CONGRESO

- Lic. Eleonor León Torres
- Lic. Annette Torres
- Lic. Lucero Alvarado Ramírez
- Lic. Alfonso Martínez López
- Lic. Guillermo Ramírez Barajas
- Lic. José Ignacio Diego Manrique
- Lic. Juvenal Iván Hernández Guevara



JUVENTUD CIENTÍFICA

DE GUANAJUATO



CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN OPTICA, A.C.

EDITORIAL

Nos enorgullece presentar las Memorias del 2do Congreso de la Juventud Científica de Guanajuato 2025, organizado por el Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. (CIO) bajo los esfuerzos de la red RIDTEM —Red de Investigación y Desarrollo de Tecnologías Emergentes para la Mitigación de CO₂—. Este congreso se llevó a cabo del 10 al 12 de septiembre de 2025 en León, Guanajuato, y fue diseñado especialmente para estudiantes de licenciatura y posgrado interesados en investigación científica y desarrollo tecnológico.

Uno de los principales propósitos del congreso fue ofrecer a los estudiantes de licenciatura una perspectiva clara y accesible sobre los diferentes caminos profesionales que pueden elegir tras su formación: pueden integrarse al sector productivo, involucrarse en la industria, continuar estudios de posgrado o adentrarse en investigación académica. Para quienes cursan posgrado, el evento brindó un espacio para compartir resultados, presentar proyectos y vislumbrar opciones de desarrollo académico o colaborativo.

Este evento también es consistente con la filosofía de ciencia abierta promovida por la comunidad científica local. Al generar estas memorias, buscamos difundir de forma amplia los aportes y avances presentados durante las sesiones de trabajo, contribuyendo así al acceso y circulación del conocimiento.

El formato del congreso facilitó una interacción real entre estudiantes y expertos de ámbitos académicos e industriales. En particular, la mesa de debate “Academia–Industria” permitió reflexionar sobre las competencias y oportunidades en ambos sectores. Estas interacciones ayudan a quienes participamos a tomar decisiones más informadas sobre su futuro profesional, explorando posibilidades, entendiendo requisitos y visualizando escenarios.

Agradecemos profundamente a quienes contribuyeron con sus trabajos, asistieron a las conferencias o aportaron en los talleres de redacción científica y divulgación. Su participación hace posible que este congreso cumpla su vocación: construir un puente entre generaciones, ideas, disciplinas y trayectorias profesionales. Esperamos que estas memorias sirvan como inspiración, referencia y guía para futuras iniciativas, así como un testimonio del talento y compromiso de la juventud científica guanajuatense.

**Comité Organizador
2do Congreso de la Juventud Científica
de Guanajuato**

INDICE

- 01** APLICACIÓN DE UN SISTEMA ACUOSO BIFÁSICO COMPUESTO POR POLIETILENGLICOL-1000 g/mol Y CITRATO DE SODIO PARA LA RECUPERACIÓN Y DEGRADACIÓN SIMULTÁNEA DE COLORANTES CARMÍN Y AZUL DE METILENO.
- 14** CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA DE CANDIDA ALBICANS EN FROTIS MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES
- 28** DEGRADACIÓN DE PET RESIDUAL MEDIANTE PROCESAMIENTO HIDROTHERMAL PARA LA OBTENCIÓN DE COMPUESTOS DE ALTO VALOR AGREGADO
- 42** ESPECTROSCOPIA ÓPTICA APLICADA AL DIAGNÓSTICO NO INVASIVO DEL ESTADO FOLIAR DE HOJAS DE FRESA
- 49** SISTEMAS ACUOSOS BIFÁSICOS COMO ALTERNATIVA ECOLÓGICA PARA DISMINUIR LA CONCENTRACIÓN DE FENOLFTALEÍNA PRESENTE EN RESIDUOS DE LABORATORIO: ESTUDIO PRELIMINAR
- 59** EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO DE PLOMO: INFLUENCIA DEL TIPO DE EXTRACTANTE, PH Y EL MODIFICADOR ORGÁNICO
- 69** DISEÑO DE SISTEMA ELECTRÓNICO REGULADOR Y OPTIMIZADOR DE CONSUMO DE AGUA PARA EL RIEGO DE CULTIVOS Y PLANTAS
- 79** SISTEMA DE PANELES DIDÁCTICOS PARA LA ENSEÑANZA DE CONTROL INDUSTRIAL EN INSTITUCIONES DE NIVEL MEDIA SUPERIOR Y SUPERIOR
- 93** ESTUDIO AB INITIO DE CALIXARENO PARA SU USO EN SENSORES DE GASES CONTAMINANTES
- 103** CORRECCIÓN DE CONTRASTE Y DETECCIÓN DE BORDES EN TOMOGRAFÍAS CEREBRALES MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

**APLICACIÓN DE UN SISTEMA ACUOSO BIFÁSICO
COMPUESTO POR POLIETILENGLICOL-1000 g/mol Y
CÍTRATO DE SODIO PARA LA RECUPERACIÓN Y
DEGRADACIÓN SIMULTÁNEA DE COLORANTES
CARMÍN Y AZUL DE METILENO.**



**APLICACIÓN DE UN SISTEMA ACUOSO BIFÁSICO COMPUESTO POR
POLIETILENGLICOL-1000 g/mol Y CITRATO DE SODIO PARA LA RECUPERACIÓN Y
DEGRADACIÓN SIMULTÁNEA DE COLORANTES CARMÍN Y AZUL DE METILENO.**

Lucila del Rocío González Hinojosa¹, Diana Esmeralda Martínez Rodríguez¹, Mario Ávila
Rodríguez².

¹División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.

²Departamento de Química. División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato,
Universidad de Guanajuato.

Correo electrónico del autor de contacto: ldr.hinojosavaldes@ugto.mx

RESUMEN

El sistema acuoso bifásico (SAB), compuesto por PEG-1000 g/mol y citrato de sodio, se destaca por ser respetuoso con el medio ambiente, por lo que se aplicó al estudio de la recuperación y degradación simultánea de colorantes azul de metileno y carmín, dos compuestos de relevancia ambiental. Estas moléculas, presentes en residuos industriales, presentan alta estabilidad y baja biodegradabilidad, lo que complica su eliminación por métodos convencionales. Los resultados experimentales demostraron que el SAB logró una eficiencia de extracción superior al 95 % hacia la fase polimérica. Además, mediante espectroscopía UV-Vis se evidenció que ambos colorantes se degradaron completamente en dicha fase, con una velocidad significativamente mayor en comparación con el medio acuoso convencional. Visualmente, se observó una pérdida notable de color, lo que respalda la efectividad del sistema. Se sugiere que factores como el pH, la concentración de PEG y la presencia de sales favorecen procesos como oxidación o hidrólisis. Estos hallazgos posicionan al SAB no solo como herramienta de separación, sino como medio reactivo eficiente para la degradación de contaminantes. La metodología propuesta reduce el tiempo de tratamiento sin requerir agentes externos, alineándose con principios de química verde. Se plantean estudios cinéticos y analíticos futuros para ampliar su aplicación.

Palabras clave: Azul de metileno; Carmín; Colorantes; Sistema acuoso bifásico; Degradación; Extracción.

1. INTRODUCCIÓN

El empleo de colorantes en diversas industrias como la textil, alimentaria y farmacéutica ha causado un aumento significativo en la presencia de compuestos orgánicos persistentes en aguas residuales. Entre los colorantes más destacados se encuentran el azul de metileno y el carmín, debido a sus propiedades tintóreas y alta estabilidad química. Sin embargo, la liberación de estos compuestos al ambiente acuático representa desafíos ambientales y de salud pública, ya que su eliminación mediante procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales tiene una eficiencia limitada [1-2].

El azul de metileno ($C_{16}H_{18}ClN_3S$) es un colorante catiónico de la familia de los fenotiazínicos. Presenta una fuerte absorción en la región visible (~660–670 nm), y se distingue por su estabilidad y capacidad de formar agregados en solución. Además de su uso en la industria textil, el azul de metileno se aplica como colorante biológico, en medicina para el tratamiento de metahemoglobinemia y como compuesto modelo en estudios de adsorción y fotocatalisis debido a su fácil monitoreo espectrofotométrico [1-2]. Sin embargo, en ambientes acuáticos el azul de metileno es persistente y puede presentar efectos ecotoxicológicos, lo que dificulta su eliminación por procesos de biodegradación natural [3].

El carmín ($C_{22}H_{20}O_{13}$), también conocido como carmín de cochinilla, es un colorante natural cuyo principal componente es el ácido carmínico, una antraquinona glucosilada obtenida de insectos de la especie *Dactylopius coccus*. Este compuesto es ampliamente utilizado en la industria alimentaria (aditivo E120), cosmética y textil, debido a la intensidad y estabilidad del color rojo que confiere [4-5]. Aunque su origen natural lo hace más biodegradable que colorantes sintéticos, en matrices complejas el carmín puede persistir y requerir tratamientos específicos de oxidación o adsorción para su completa eliminación de aguas residuales [5].

Ambos colorantes se utilizan también como compuestos modelo en estudios de tratamiento de aguas residuales, debido a su disponibilidad y facilidad de seguimiento espectroscópico [1,4].

La biodegradación espontánea de los colorantes es limitada debido a su estructura aromática conjugada, lo que dificulta la acción enzimática. El azul de metileno puede degradarse

parcialmente mediante consorcios microbianos y algas, aunque el proceso es lento y depende de la concentración y las condiciones ambientales [6]. El carmín, por su naturaleza, es más susceptible a la biodegradación, pero en efluentes industriales complejos suele ser resistente a tratamientos convencionales [5].

Los métodos más empleados para eliminar colorantes incluyen:

- Adsorción: mediante carbón activado, biocarbones, zeolitas o materiales de grafeno, con alta eficiencia en la remoción de azul de metileno [7].
- Procesos de oxidación avanzada (AOPs): tales como UV/H₂O₂, ozonización, foto-Fenton y fotocatalisis con TiO₂ o ZnO, que generan radicales hidroxilo capaces de mineralizar los colorantes [8].
- Biodegradación: a través de lodos activados, hongos o microalgas, con resultados variables dependiendo de la matriz y la concentración del colorante [6].
- Procesos de membranas y electroquímicos: incluyen nanofiltración y electro-Fenton, efectivos, pero de mayor costo energético [8].

Las investigaciones actuales se centran en el desarrollo de tecnologías sostenibles y más eficientes, entre las que destacan:

- Nanomateriales fotocatalíticos dopados que permiten degradación bajo luz visible [3].
- Materiales híbridos adsorbente-fotocatalíticos, como hidrogeles con carbón activado y TiO₂, que combinan captura y degradación [7].
- Procesos electro-Fenton avanzados, que generan oxidantes in situ con alta eficiencia [8].
- Biorremediación con algas y bacterias, optimizando consorcios microbianos para degradación de azul de metileno [6].

Estos enfoques han mostrado eficiencias de eliminación superiores al 90 %, aunque aún se evalúa su escalabilidad industrial.

Este proyecto propone el uso de sistemas bifásicos acuosos (SAB o ATPS) como alternativa prometedora para la separación y concentración de estos colorantes. Estos sistemas de extracción líquido-líquido están formados por dos fases acuosas inmiscibles, típicamente una fase rica en polímero (p. ej., PEG) y otra en sales (p. ej., citrato, fosfato) o un segundo polímero (p. ej.,

dextrano) [9]. Estos sistemas permiten la separación selectiva de biomoléculas, partículas y compuestos bajo condiciones suaves y biocompatibles.

Entre sus ventajas se encuentran: condiciones acuosas y biocompatibles, alta selectividad y posibilidad de escalado y uso continuo [10]. Sin embargo, también presentan limitaciones, como el costo en la recuperación de polímeros y sales, la complejidad para predecir la partición y la interferencia de sólidos presentes en aguas residuales [10].

Con este enfoque se justifica entonces la propuesta de este proyecto de investigación cuyo objetivo principal consiste en evaluar la eficacia de un SAB, compuesto por polietilenglicol 1000 g/mol y citrato de sodio, para la extracción de ambos colorantes y analizar el comportamiento de degradación de los colorantes, una vez extraídos en la fase superior, esto con el fin de proponer alternativas para el tratamiento de aguas residuales que combinen la separación y degradación.

2. METODOLOGIA

2.1. Proceso de extracción y degradación de azul de metileno y carmín utilizando un sistema acuoso bifásico.

Para la extracción de los analitos, se prepararon soluciones acuosas de 10 ppm de cada colorante: carmín disuelto en NaOH 0.01 M y azul de metileno disuelto en agua destilada. La cuantificación de los colorantes presentes en medio acuoso se realizó mediante espectrofotometría UV-Vis, registrando la absorbancia correspondiente a cada colorante.

Para el proceso de extracción se siguió el diagrama mostrado en la [Figura 1](#), en donde se prepararon los SAB utilizando polietilenglicol (PEG) de 1000 g/mol y citrato de sodio como componentes formadores de fases [11]. Posteriormente, se añadió la solución de colorante (10 ppm). El contenido se agitó suavemente hasta la homogenización de los componentes y así favorecer la formación de las dos fases acuosas inmiscibles: fase polimérica (FP) y fase salina (FS). Posteriormente, el tubo se deja en reposo hasta la completa separación de las fases. Una vez separadas las fases, se procede a la caracterización y cuantificación de los colorantes presentes en fase polimérica mediante espectrofotometría UV-Vis, registrando la absorbancia correspondiente a cada colorante para determinar la eficiencia de extracción. La degradación de

los colorantes en fase polimérica se monitoreo mediante espectroscopia UV-Vis durante 5 semanas para carmín y 6 semanas para azul de metileno (semana etiquetada como D1 hasta D6).

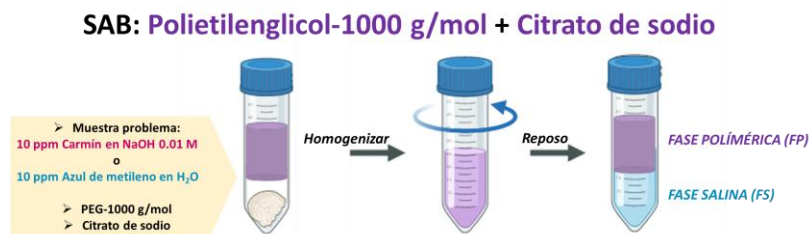


Figura 1. Metodología para la extracción de los colorantes azul de metileno y carmín utilizando SAB.

2.2. Determinación de pH antes y después del proceso de extracción y degradación.

La determinación del pH (Figura 2) en cada una de las fases del SAB se llevó a cabo tanto antes como después del proceso de extracción y degradación del colorante. El potenciómetro (Marca: Metrohm, Modelo: 913 pH meter) fue calibrado con soluciones tampón de referencia (pH 4.00, 7.00 y 10.010) a fin de garantizar lecturas confiables. Una vez formadas las fases del ATPS (fase polimérica y fase salina), se procedió a la toma de muestra de cada una de ellas, evitando la zona de interfase para prevenir contaminación. Las muestras se colocaron en recipientes limpios y se midió su pH mediante inmersión directa del electrodo, registrando también la temperatura (25 °C).

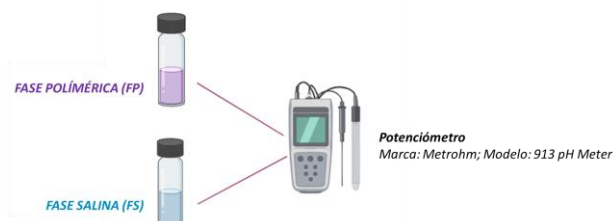


Figura 2. Diagrama representativo de la determinación de pH antes y después del proceso de extracción y degradación de los colorantes azul de metileno y carmín utilizando SAB.

2.3. Cuantificación y caracterización de azul de metileno y carmín mediante espectroscopia UV-Visible.

La cuantificación y caracterización de azul de metileno y carmín en medio acuoso y en fase polimérica se realizó mediante espectroscopia UV-Visible (Figura 3) en un espectrofotómetro

Varian (Modelo: Cary 50 Probe). Para cada colorante se prepararon curvas de calibración a partir de soluciones estándar en ambas matrices (acuosa y polimérica del SAB), en los rangos de 0 – 5 ppm para azul de metileno y 0 – 10 ppm para carmín. Las muestras de ambas fases, antes y después de la extracción, fueron separadas y analizadas por triplicado, registrando sus valores de absorbancia frente al blanco en la zona visible. La concentración de cada colorante se calculó a partir de la ecuación de regresión lineal obtenida en la curva de calibración correspondiente, mientras que los espectros completos permitieron identificar posibles desplazamientos y cambios en la absorbancia en el $\lambda_{\text{máx}}$ de la región visible del espectro.

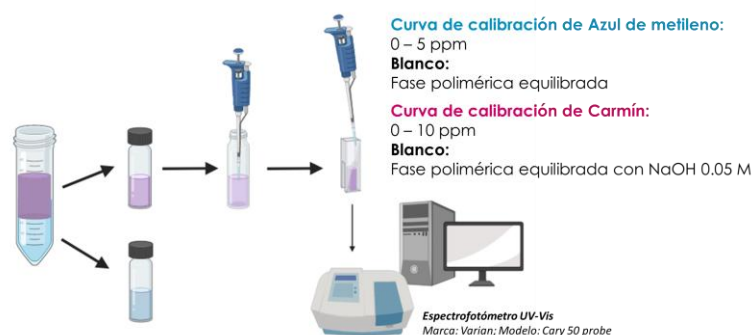


Figura 3. Esquema del procedimiento experimental para la cuantificación de azul de metileno y carmín mediante espectroscopía UV-Vis.

3. ANALISIS Y RESULTADOS

3.1. Recuperación de azul de metileno y carmín con el SAB: PEG-1000/Citrato de sodio.

El SAB utilizado es eficiente para recuperar un gran porcentaje de ambos colorantes, estos resultados se muestran en la [Tabla I](#). Sin embargo, se observan diferentes porcentajes de recuperación, teniendo una mayor extracción del carmín, esto puede deberse a que el carmín posee múltiples grupos –OH y –COOH capaces de formar puentes de hidrógeno con PEG y de interactuar con citrato por acoplamiento iónico. Mientras que el azul de metileno, al ser una molécula plana y catiónica, interactúa principalmente por fuerzas de dispersión y carga, pero sin anclajes múltiples como los del carmín, además de que es una molécula más hidrofílica, esto lo hace menos afín a la fase polimérica, esta fase tiene un carácter más hidrofóbico.

Tabla I. Porcentajes de recuperación de azul de metileno y carmín utilizando el ATPS: PEG-1000/Citrato de sodio.

Colorante	Porcentaje de recuperación en una sola etapa
Azul de metileno	90.82 ± 3.92 %
Carmín	95.48 ± 3.17 %

3.3. Degradación de azul de metileno y carmín en fase polimérica del ATPS PEG-1000/Citrato de sodio.

En la [Figura 4A](#), se puede observar que la banda característica del azul de metileno en 665 nm tiene una ligera disminución de intensidad desde D1 a D6. Esto indica que en el medio de agua desionizada la molécula es más estable y apenas se degrada ligeramente con el tiempo. Caso contrario, en la [Figura 4B](#), se muestra una disminución drástica y progresiva de la banda en 665 nm hasta casi desaparecer en D6, esto evidencia que el azul de metileno, al estar extraído en la fase polimérica, pierde rápidamente su señal en el rango visible lo que sugiere que el analito presenta una transformación química. Este comportamiento de la pérdida de coloración a causa de la degradación del azul de metileno se pudo observar de manera cualitativa en la [Figura 5](#), en donde se puede observar al colorante extraído en la fase polimérica (superior) ([Figura 5A](#)) y al pasar de las 6 semanas se puede observar la pérdida de color en esta fase ([Figura 5B](#)).

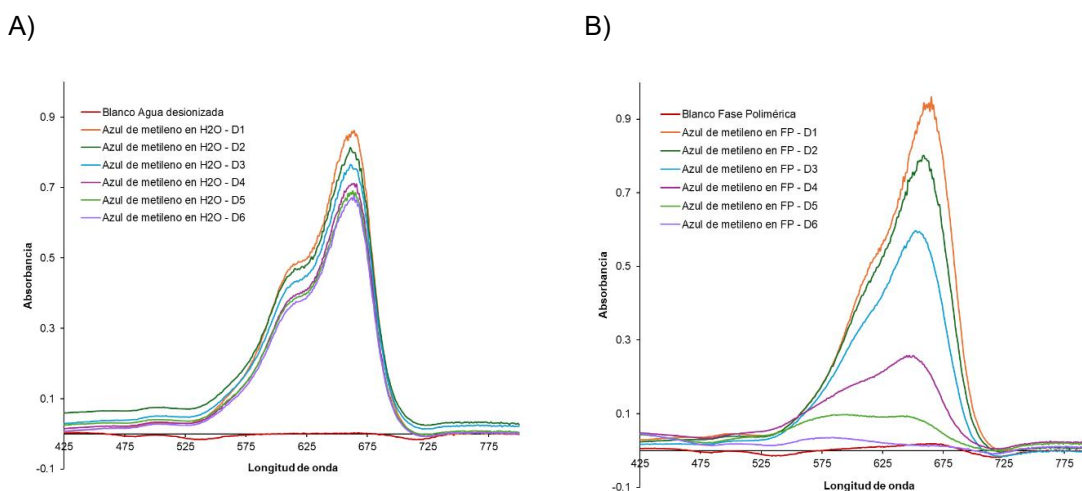


Figura 4. Espectros UV-Vis de azul de metileno en A) medio acuoso y B) fase polimérica del ATPS: PEG-1000/citrato de sodio, mostrando degradación acelerada tras la extracción.

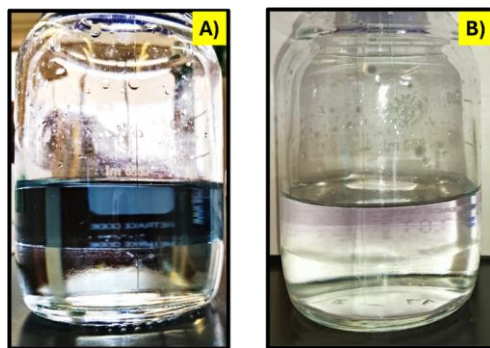


Figura 5. Evolución visual de la degradación del azul de metileno en fase polimérica del ATPS: PEG-1000/Citrato de sodio, mostrando la pérdida progresiva de color con el tiempo.

En la Figura 6 se muestra un comportamiento análogo al anteriormente descrito, pero con el carmín como colorante estudiado. La Figura 6A muestra cómo la absorbancia en la zona visible del carmín disminuye lentamente con el tiempo, esto indica que en medio acuoso alcalino (NaOH 0.01 M) hay cierta degradación, pero ocurre de forma lenta. Por otro lado, en la Figura 6B la señal disminuye más rápido, desapareciendo en D4 y D5. Este comportamiento demuestra que, al igual que el azul de metileno, la fase polimérica acelera el proceso de degradación del analito de interés. La pérdida de coloración a causa de la degradación del carmín se pudo observar de manera cualitativa en la Figura 7, en donde se puede observar al colorante extraído en la fase polimérica (Figura 7A) y al pasar de las 5 semanas se presenta la pérdida de color en esta fase (Figura 5B).

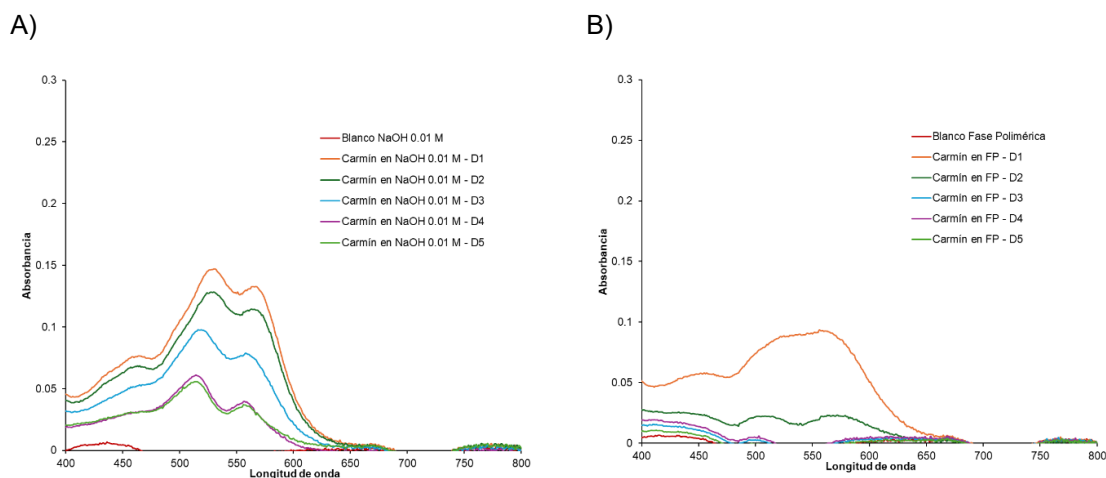


Figura 6. Espectros UV-Vis del carmín en A) medio acuoso alcalino (NaOH 0.01 M) y B) fase polimérica del ATPS: PEG-1000/citrato de sodio, mostrando degradación acelerada tras la extracción.

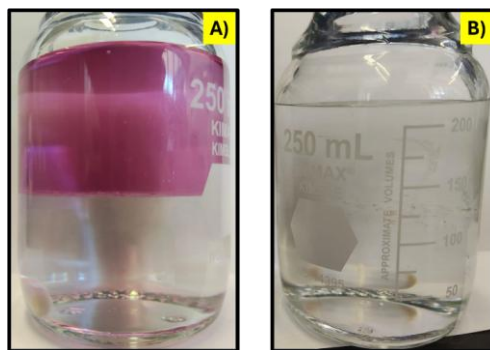


Figura 7. Evolución visual de la degradación del carmín en fase polimérica del ATPS: PEG-1000/Citrato de sodio, mostrando la pérdida progresiva de color con el tiempo.

Respecto al pH ([Tabla II](#)) se puede observar que no hay un cambio significativo en el valor del pH conforme pasaron las semanas de monitoreo de degradación, por lo que entonces esta estabilidad del pH durante el experimento indica que este factor no influyó significativamente en la degradación de los colorantes. Esto implica que: Los mecanismos de degradación no dependieron del pH, descartándose procesos como hidrólisis ácida o básica. La degradación del Carmín fue probablemente causada por oxidación o fotólisis [12]. La degradación del Azul de Metileno coincide con su conocido comportamiento redox, donde las reacciones de oxidación-reducción pueden ocurrir sin alterar el pH. La transformación de ambas moléculas fue impulsada por mecanismos independientes del pH, como reacciones redox o procesos fotolíticos, por lo tanto, podría inferirse que esta transformación de la molécula no fue tan influenciada por el pH.

Tabla II. pH antes y después del proceso de extracción y degradación de azul de metileno y carmín.

	Azul de metileno	Carmín
Antes de la extracción en FP	7.03	8.40
Extraído en FP y después del tiempo de degradación	7.27	8.61

En general, estos resultados muestran que el comportamiento de degradación en fase polimérica puede deberse a distintas razones:

- I) La concentración de los colorantes en la fase polimérica, por el efecto *salting-out*, puede elevar la absorción de la luz en el medio y, por lo tanto, que ocurran reacciones que modifiquen los equilibrios de los colorantes.
- II) El citrato puede comportarse como donador de electrones y modifica el pH del medio, esto puede causar reacciones redox.
- III) En la fase polimérica hay una menor actividad del agua y una mayor viscosidad, esto puede reducir la difusión de oxígeno y modificar los equilibrios de oxidación/reducción [13].

La diferencia entre los colorantes radica en la forma en cómo ocurre su posible mecanismo de degradación. En el azul de metileno, la principal ruta es la fotoreducción a la forma leuco-azul de metileno [14], este es un proceso reversible en donde la banda visible (665 nm) desaparece, pero puede recuperarse al reoxidar con aire u otros agentes oxidantes. La fase polimérica puede favorecer este mecanismo debido a la presencia de agentes reductores como el citrato y el PEG, así como la menor reoxigenación en el medio viscoso.

En el carmín, al tener naturaleza como compuesto antraquinónico, es más sensible a la degradación oxidativa irreversible [15]. La pérdida de la absorbancia en la zona visible puede indicar la ruptura o la modificación química del cromóforo y no sólo un cambio redox reversible.

4. CONCLUSIONES

El sistema acuoso bifásico compuesto por PEG-1000 y citrato de sodio demostró ser una herramienta eficaz para la extracción y degradación simultánea de los colorantes azul de metileno y carmín. Se logró una eficiencia de extracción superior al 95 % para el carmín y cercana al 91 % para el azul de metileno, concentrándose ambos en la fase polimérica. Además, se observó una degradación acelerada de ambos colorantes en la fase polimérica en comparación con el medio acuoso convencional, evidenciada por la pérdida progresiva de color y la disminución de la absorbancia en la región visible. Esta degradación no dependió significativamente del pH, lo que

sugiere mecanismos alternativos como oxidación, fotólisis o reacciones redox favorecidas por las condiciones del SAB, tales como la presencia de citrato, la alta viscosidad y la menor actividad de agua.

El SAB propuesto en este proyecto resultó ser una alternativa prometedora y sostenible para el tratamiento de medios acuosos con presencia de estos colorantes, al integrar en un solo proceso la separación y degradación sin requerir agentes externos adicionales, alineándose con los principios de la química verde.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer a las siguientes instituciones y personas por su contribución a este trabajo:

- A la Universidad de Guanajuato y al Laboratorio Nacional LANCAPFEM-UG-UAA.
- Al Cuerpo Académico de Química Analítica Ambiental y de Procesos Industriales de la División de Ciencias Naturales y Exactas, en especial al Dr. Mario Ávila Rodríguez y a la M.C. Diana Esmeralda Martínez Rodríguez, por su fundamental asesoría y guía.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Khan, I., et al. (2022). Methylene blue: Properties, uses, toxicity and remediation. *Water*, 14(18), 2856. <https://doi.org/10.3390/w14182856>

[2] Oladoye, P. O. (2022). Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102755. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102755>

[3] Liang, P., et al. (2024). Efficient degradation of methylene blue in industrial wastewater using photocatalytic composites. *Journal of Hazardous Materials*, 460, 132387. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.132387>

[4] Ochoa Manzo, G. M., et al. (2025). Carmine red from cochineal: A review on applications and extraction technologies. *Journal of Food Science*, 90(1), 112–125. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17025>

- [5] Ferreyra-Suarez, D., López, C., & García, R. (2024). Extraction pathways and purification strategies towards carminic acid. *Food Chemistry*, 425, 136742. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.136742>
- [6] Zhang, X., et al. (2024). Algal-mediated degradation of methylene blue: Mechanisms and optimization. *Bioresource Technology*, 382, 129178. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.129178>
- [7] Shah, S. S., et al. (2023). Deep removal and photodegradation of methylene blue via biodegradable superabsorbent polymer composites with activated carbon and TiO₂. *ACS Omega*, 8(32), 29612–29623. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01234>
- [8] Sugha, A., et al. (2022). Advanced oxidation processes for dye removal: UV/H₂O₂ degradation of methylene blue. *Chemosphere*, 304, 135234. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135234>
- [9] Iqbal, M., Tao, Y., & Chen, D. (2016). Aqueous two-phase system (ATPS): An overview and applications. *Biological Procedures Online*, 18(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s12575-016-0048-6>
- [10] Bekavac, N., et al. (2024). Advancements in aqueous two-phase systems for biotechnological applications. *PNAS Nexus*, 3(2), 125–137. <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pnad022>
- [11] Martínez-Rodríguez DE, Martínez-Rodríguez ED, Hernández-Perales L, González-Muñoz MDP, Avila-Rodriguez M. Study of diclofenac distribution in aqueous two-phase PEG/salt/water systems. *RSC Adv.* 2025 Jun 23;15(26):21168-21182. doi: 10.1039/d5ra01070e. PMID: 40551830; PMCID: PMC12183683.
- [12] Hassan, M. M., & Carr, C. M. (2018). A critical review on recent advancements of the removal of reactive dyes from dyehouse effluent by ion-exchange adsorbents. *Chemosphere*, 209, 201-219.
- [13] Pavlović, M., Plucinski, A., Zhang, J., Antonietti, M., Zeininger, L., & Schmidt, B. V. K. J. (2020). Cascade kinetics in an enzyme-loaded aqueous two-phase system. *Langmuir*, 36(6), 1401–1408. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c00186>
- [14] Cedeño, F., Párraga, R., & García, G. (2023). *Degradación de azul de metileno por fotólisis: efecto de variables del proceso.*

ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/374500919_Degradacion_de_azul_de_metileno_por_fotolisis_efecto_de_variables_del_proceso

[15] Gómez, J. L., Bafico, J., & Erben, M. F. (2021). Stability of carminic acid and its application in food and cosmetics: A review. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 20(10), 3126-3135. <https://doi.org/10.1111/jocd.14390>

CLASIFICACIÓN MORFOLOGÍA DE CANDIDAD ALBICANS EN FROTIS MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES



CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA DE CANDIDA ALBICANS EN FROTIS MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Laila Aguilar Vichido ¹, Fernando Castillo Negrete ², Manuel Leon Madrid ³

¹ División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato, Campus León.

Correo electrónico del autor de contacto: ln.aguilavichido@ugto.mx

RESUMEN

Las infecciones causadas por *Candida albicans* son una de las principales micosis oportunistas en humanos, detectadas comúnmente mediante el análisis microscópico de frotis teñidos con Gram. El diagnóstico convencional requiere la identificación visual de estructuras fúngicas como blastoconidias y pseudohifas, lo cual depende en gran medida del criterio del observador. En este trabajo se presenta un enfoque de procesamiento digital clásico, desarrollado en MATLAB, para la segmentación y clasificación morfológica de estructuras celulares de *Candida albicans*. La metodología emplea preprocesamiento con filtrado adaptativo, realce de contraste, binarización dinámica y operaciones morfológicas para separar regiones de interés. Posteriormente, se aplican técnicas como la transformada de Hough, análisis de forma (excentricidad, elongación, área) y etiquetado de componentes conectados para distinguir entre blastoconidias y pseudohifas. El sistema busca facilitar el análisis cuantitativo, objetivo y reproducible de muestras clínicas, reduciendo la dependencia de observadores expertos y permitiendo un soporte diagnóstico accesible.

Palabras clave: *Candida Albicans*; Clasificación; MATLAB; blastoconidias; pseudohifas.

1. INTRODUCCIÓN

La identificación morfológica precisa de células malignas linfoides es esencial para el diagnóstico y tratamiento oportuno de diversas enfermedades, para este caso la Candidiasis, una infección primaria o secundaria, causada por levaduras del género *Candida*, con manifestaciones clínicas extremadamente variables de evolución aguda, subaguda, crónica o episódica, en las cuales el hongo puede causar lesiones cutáneas, muco cutáneas, profundas ó diseminadas. [1]

El diagnóstico de candidiasis frecuentemente requiere la inspección microscópica de frotis clínicos (por ejemplo, exudados vaginales, orales o preparaciones de biopsias) para identificar la presencia de *Candida* y distinguir sus formas morfológicas.

El objetivo es desarrollar un programa para identificar las células *Candida* en su forma de pseudohifas para el apoyo de la identificación de la patología Candidiasis. En este trabajo se presenta un enfoque de procesamiento digital de imágenes para la clasificación morfológica automática de *Candida albicans* en frotis. En particular, el sistema propuesto discrimina entre blastoconidios (células de levadura individuales o en gemación) y pseudohifas (cadenas de células alargadas) observados en micrografías, ya que diferenciar estas formas ayuda a interpretar la significación clínica de la muestra. La finalidad es apoyar el diagnóstico proporcionando una clasificación objetiva de las formas morfológicas presentes, lo que podría agilizar y estandarizar la interpretación microscópica en entornos clínicos y de investigación.

2. MARCO TEÓRICO

La mayor parte de las candidiasis orales tienen un diagnóstico clínico, pero ha de confirmarse demostrando la penetración de la cándida en la mucosa oral, siendo el frotis la técnica de elección.[2]

De hecho, la Candida desempeña un papel beneficioso en nuestro organismo, por ejemplo, contribuyendo a la maduración del sistema inmunitario y a la fermentación de azúcares durante la digestión. Sin embargo, cuando el equilibrio del microbiota se altera (por inmunosupresión, antibioterapia prolongada, etc.), la Candida puede proliferar de forma oportunista y convertirse en patógeno. Es importante conocer que tipo de Candida es para poder dar un mejor tratamiento al paciente.

Para la parte de análisis digital de imágenes ha sido propuesto como apoyo diagnóstico para el reconocimiento morfológico de células el procesamiento digital de imágenes, mediante la segmentación y extracción de características como forma, textura y color, ya que es posible identificar patrones asociados a células malignas. [3]

Antes de empezar a trabajar con las imágenes debemos tener varias cosas en cuenta antes de realizar un procesado en ella. Ya que es importante realizar su histograma para ver las características morfológicas importantes que a simple vista no podemos ver. [4,5]

Las imágenes se pueden caracterizar útilmente mediante sus histogramas de niveles de gris o en sus diferentes canales, a partir de los cuales se pueden determinar características globales como el brillo, el contraste, la entropía y la relación señal-ruido. Los histogramas son fáciles de calcular y constituyen la base de diversas técnicas de procesamiento de imágenes en tiempo real. Las tablas de consulta de visualización permiten realizar transformaciones en escala de grises, de modo que la apariencia visual de una imagen se modifica sin alterar los valores de los píxeles que la componen. El histograma de una imagen puede utilizarse para determinar los parámetros de las tablas de consulta que implementan diversos efectos. [5]

Posteriormente se empieza con la mejora de imágenes, que consiste en procesar imágenes para mejorar su apariencia para el observador humano, en términos de mejor contraste y visibilidad de las características de interés, o para optimizar su rendimiento en análisis y diagnósticos asistidos por computadora posteriores. Dado que el objetivo de la mejora de imágenes depende del contexto de la aplicación y suele estar mal definido, y los criterios suelen ser subjetivos, las técnicas de mejora de imágenes tienden a ser complicadas. Estas técnicas incluyen operaciones puntuales, donde el valor del píxel de salida depende únicamente de su valor de entrada correspondiente, y operaciones locales o de vecindad, donde el valor final del píxel de salida depende de la vecindad de los valores de los píxeles de entrada. Estas últimas operaciones incluyen la convolución, que utiliza máscaras o núcleos apropiados para suavizar o enfocar una imagen. [5]

Estas operaciones incluyen detección de bordes (Canny), transformadas de Hough para estructuras circulares, y operadores morfológicos para segmentación binaria.

Detección de bordes (Canny): El algoritmo de Canny, introducido por John Canny en 1986, es una de las técnicas más utilizadas para detección de bordes debido a su capacidad para maximizar la precisión y reducir el ruido. Este método implica una suavización inicial con un filtro gaussiano, seguida del cálculo del gradiente de intensidad, supresión de no-máximos, y umbralización con histéresis. [6]

Transformadas de Hough: La transformada de Hough es una técnica matemática robusta para la detección de formas geométricas. Para estructuras circulares como núcleos celulares o eritrocitos, se implementa la versión circular de esta transformada, que permite identificar regiones basadas en el parámetro de radio. Ha sido utilizada en estudios de conteo de glóbulos rojos y para segmentar blastos de fondo celular denso. [7]

También existen herramientas de procesamiento morfológico en imágenes, que ayuda a extraer o modificar información sobre la forma y la estructura de los objetos dentro de una imagen. Los operadores morfológicos, como la dilatación, la erosión y la esqueletización, son particularmente útiles para el análisis de imágenes binarias, aunque pueden extenderse para su uso con imágenes

en escala de grises. Los operadores morfológicos son no lineales y sus usos comunes incluyen el filtrado, la detección de bordes, la detección de características, el recuento de objetos en una imagen, la segmentación de imágenes, la reducción de ruido y la búsqueda de la línea media de un objeto. [5]

Operadores morfológicos: Basados en la teoría de conjuntos y espacios métricos, los operadores morfológicos como la erosión, dilatación, apertura y cierre son fundamentales para refinar imágenes binarizadas. Se utilizan para eliminar ruido (apertura), rellenar huecos en estructuras (cierre), o separar objetos que están parcialmente unidos (erosión + dilatación). Su aplicación en frotis permite mejorar la calidad de la segmentación y reducir falsos positivos en la detección. [8,9]

La segmentación de imágenes es un campo amplio y activo, no solo en imágenes médicas, sino también en visión artificial e imágenes satelitales. Su propósito es dividir una imagen en regiones significativas para una tarea específica. Se utilizan diversos métodos y enfoques; la elección de un método en particular depende de las características del problema a resolver y de su lugar en una estrategia más amplia de análisis de imágenes. La segmentación es un paso esencial previo a la descripción, el reconocimiento o la clasificación de una imagen o sus componentes. Existen dos enfoques principales: los métodos basados en regiones, en los que se detectan similitudes, y los métodos basados en límites, en los que se detectan discontinuidades (bordes) y se vinculan para formar límites alrededor de las regiones. Para desarrollar sistemas de interpretación robustos, es importante utilizar la mayor cantidad posible de información relevante a priori durante la segmentación. [5]

Todas estas técnicas de procesamiento de imágenes son importantes para extraer información morfológica de manera reproducible.

METODOLOGIA

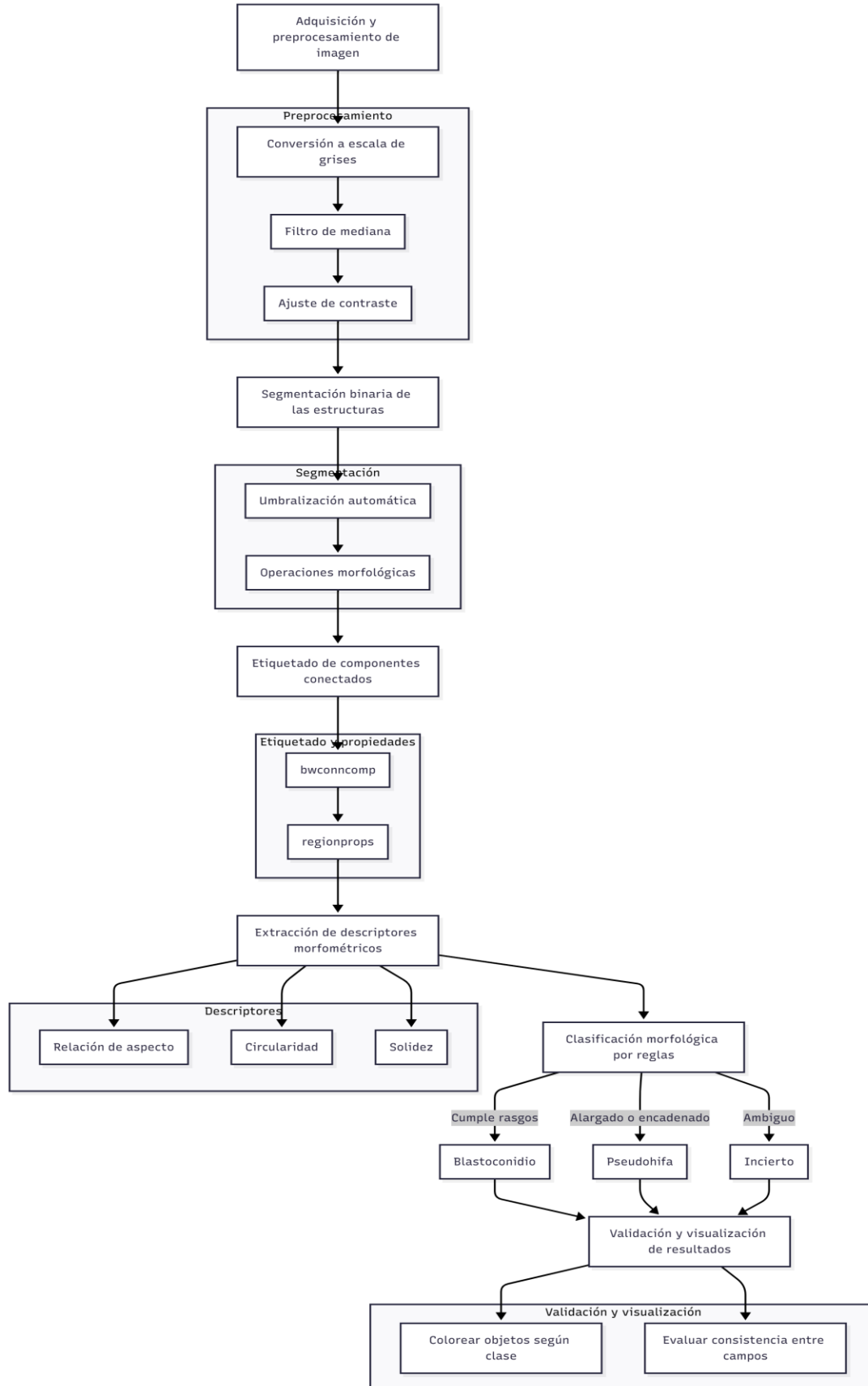
El enfoque metodológico se basó en un flujo de procesamiento digital de imágenes implementado en MATLAB para analizar micrografías de frotis con *Candida albicans*. A continuación, se describen paso a paso las etapas del procedimiento seguido:

1. Adquisición de la imagen y preprocesamiento: Se partió de imágenes digitales obtenidas de preparaciones en frotis con *Candida albicans* (microscopía óptica de campo claro con tinción apropiada). Cada imagen inicialmente fue convertida a escala de grises para simplificar el análisis. Se aplicó un filtro de mediana 2D (medfilt2) para reducir el ruido impulsivo y suavizar variaciones locales sin perder bordes importantes. Asimismo, se ajustó el contraste de la imagen con el fin de resaltar las estructuras fúngicas respecto al fondo.
2. Segmentación binaria de las estructuras: Sobre la imagen preprocesada se llevó a cabo una segmentación adaptativa para separar los elementos *Candida* del fondo. Se empleó una técnica de umbralización automática que calcula un umbral óptimo local o global para binarizar la imagen. Así, los píxeles correspondientes a las estructuras fúngicas se marcaron con valor 1 (blanco) y el fondo se marcó con 0 (negro). Adicionalmente, se aplicaron operaciones morfológicas de limpieza sobre la imagen binaria: en particular, se utilizó una apertura morfológica (erosión seguida de dilatación) para eliminar pequeños objetos ruidosos aislados y desprender partículas diminutas adheridas a las células, y se rellenaron posibles agujeros internos en las regiones detectadas para considerar cada objeto como una región sólida.
3. Etiquetado de componentes conectados: Una vez obtenida la imagen binaria depurada, se identificaron todos los objetos individuales mediante el algoritmo de componentes conectados. Con la función MATLAB `bwconncomp` (y funciones auxiliares como `regionprops`) se detectaron las regiones conexas de píxeles en la imagen binaria y se asignó una etiqueta única a cada objeto conectado. Cada etiqueta corresponde

- presumiblemente a un elemento morfológico de Candida: ya sea un blastoconidio aislado, un par de blastoconidios en gemación, o una pseudohifa compuesta por células y yemas unidas en forma de filamento. Se calcularon propiedades básicas de cada componente, como su área (número de píxeles) y el cuadro delimitador (bounding box) mínimo.
4. Extracción de descriptores morfométricos: Para cada objeto etiquetado se extrajeron sus parámetros geométricos relevantes utilizando regionprops y cálculos adicionales. En concreto, se obtuvieron: la relación de aspecto (RA) de cada objeto, calculada como la longitud de su eje mayor dividido entre la longitud de su eje menor; la circularidad, calculada a partir del área A y el perímetro P de la región para estimar la redondez de la forma; y la solidez, obtenida como el área dividido entre el área de la envolvente convexa del objeto. Estos descriptores numéricos capturan cuantitativamente la morfología de cada objeto: por ejemplo, un blastoconidio típico presentará RA baja (cerca a 1), alta circularidad y solidez próxima a 1, mientras que una pseudohifa extensa tendrá RA alta ($\gg 1$), baja circularidad y posiblemente solidez ligeramente reducida. Todos estos rasgos fueron normalizados a escalas comparables para poder combinarlos en etapas posteriores.
 5. Clasificación morfológica con regla de decisión: Finalmente, se llevó a cabo la clasificación automática de cada objeto en una categoría morfológica. Para ello se diseñó una regla de decisión que combina los descriptores morfológicos y la evidencia de Hough para asignar a cada objeto la etiqueta de blastoconidio o pseudohifa. En términos generales, la regla consideró lo siguiente: blastoconidio si el objeto presenta circularidad alta, RA baja y solidez alta (aproximándose a una forma redondeada compacta); pseudohifa si el objeto exhibe RA alta y circularidad baja (forma elongada filamentosa), acompañadas típicamente de alguna detección lineal por Hough. Los valores numéricos de los descriptores se transformaron en puntajes normalizados para cada clase (por ejemplo, un puntaje de "afinidad a blastoconidio" y otro de "afinidad a pseudohifa"), combinando linealmente las métricas con pesos calibrados empíricamente. Además, se implementó un criterio de abstención para casos dudosos: si la diferencia entre los puntajes de las dos

- posibles clasificaciones resultaba muy pequeña (es decir, si un objeto tenía características intermedias que no lo definían claramente como blasto ni como pseudohifa), entonces se le asignaba la etiqueta "INCIERTO". Este margen de indecisión intencional previene clasificaciones forzadas cuando los datos son ambiguos, garantizando mayor confiabilidad al evitar falsos positivos en la identificación de formas filamentosas. En la Figura 3 del estudio (gráfica de dispersión RA vs circularidad) puede apreciarse esta estrategia: existe una zona de solapamiento donde ambas clases convergen (marcada en amarillo) que corresponde a la región de abstención. Solo los objetos que caen claramente fuera de esa zona son clasificados firmemente como blastoconidios (alta circularidad, baja RA) o pseudohifas (alta RA, baja circularidad).
6. Validación y visualización de resultados: Los resultados de la clasificación automática se representaron visualmente para su evaluación. En las imágenes procesadas, cada objeto detectado fue resaltado y coloreado según su clase asignada. Asimismo, se aplicó el algoritmo a múltiples campos de visión de una misma preparación para verificar la consistencia del clasificador entre imágenes diferentes bajo los mismos parámetros. No obstante, incluso en esta etapa exploratoria, la herramienta demostró distinguir visualmente las morfologías y evitar decisiones erróneas en casos límite gracias al manejo de la categoría "incierto".

En la siguiente figura se muestra el diagrama realizado para la metodología,



ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para empezar, vemos en la Figura 1 como es que empezamos con la imagen a procesar



Figura 1. Espora de *Candida albicans*. Fuente: Rawpixel (s.f.), imagen bajo licencia libre.

En la figura 2 de los resultados se observan cuatro histogramas de intensidad: uno para cada canal de color (rojo, verde y azul) y otro correspondiente a la escala de grises de la imagen. Estos histogramas muestran la distribución de niveles de brillo de los píxeles en la muestra, revelando características importantes del contraste y la composición cromática de la imagen. Por ejemplo, el histograma en escala de grises típicamente exhibe un pico pronunciado en los niveles altos de intensidad (cercano al valor máximo de 255), correspondiente al fondo claro del portaobjetos, y una distribución secundaria de píxeles en intensidades más bajas asociada a las estructuras de *Candida albicans* (que suelen verse más oscuras que el fondo).

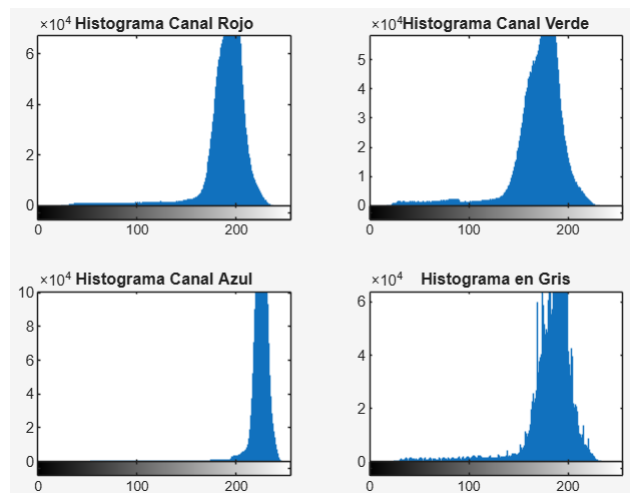
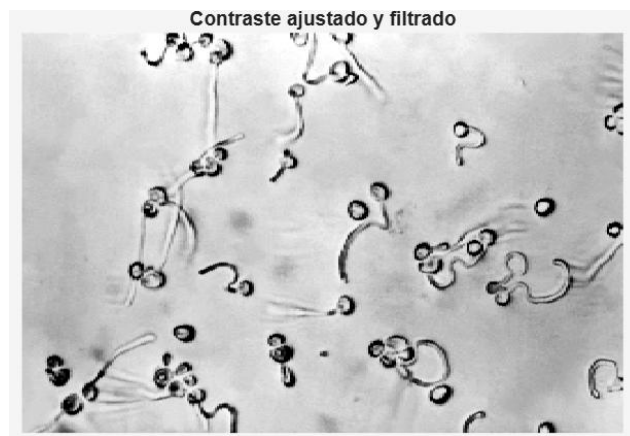


Figura 2. Histogramas en canal rojo, verde, azul y en escala de grises gris

En la [figura 3](#), antes de la segmentación, se aplicó un preprocesamiento a la imagen original con el objetivo de mejorar la detectabilidad de las estructuras. En la figura se muestra la imagen con contraste ajustado y filtrado, resultado de aplicar un filtro de mediana y técnicas de realce de contraste. Tras la filtración, se ajustó el contraste expandiendo la distribución de intensidades – por ejemplo, mediante estiramiento del histograma o ecualización – para aprovechar todo el rango tonal disponible. En la imagen preprocesada resultante se nota una mejora en la claridad: el fondo ha sido homogenizado en brillo y se han atenuado artefactos o textura no relevante, facilitando la detección de contornos de las estructuras de interés.



[Figura 3](#): Resultado de un contraste ajustado y filtrado

En la [figura 4](#) el siguiente paso consiste en segmentar la imagen para separar los elementos fúngicos del fondo, lo cual se logra mediante binarización adaptativa. En la imagen binarizada presentada, los píxeles correspondientes a estructuras de *Candida albicans* aparecen en blanco (valor 1) sobre un fondo negro (valor 0), tras aplicar un umbral de intensidad que clasifica cada píxel ya sea como objeto (hongos) o fondo. A diferencia de una simple umbralización global (que usa un único valor de umbral para toda la imagen), aquí se empleó un método adaptativo que calcula umbrales locales a lo largo de la imagen, compensando variaciones de iluminación o de fondo: la imagen se subdivide en regiones y para cada región se determina un umbral basado en las intensidades locales. Esta representación binaria es la base para el análisis cuantitativo de forma y la identificación de cada objeto en etapas posteriores.



Figura 4. Resultados de la binarización adaptativa

En la [figura 5](#), se procedió a extraer descriptores morfométricos de cada objeto para su clasificación. En particular, se midieron por objeto la relación de aspecto (RA), la circularidad y la solidez, que cuantifican distintas facetas de la forma geométrica de las estructuras. La relación de aspecto captura la elongación de la partícula (razón entre su eje mayor y menor), la circularidad mide qué tan cercano es el objeto a un círculo perfecto (considerando su área y perímetro), y la solidez refleja qué tan sólido o compacto es el objeto (comparando su área con el área de su envolvente convexa). Empleando estos descriptores, se definió una regla de clasificación para determinar automáticamente si cada objeto es un blastoconidio o una pseudohifa, o si su morfología es incierta cuando no encaja claramente en las categorías anteriores.

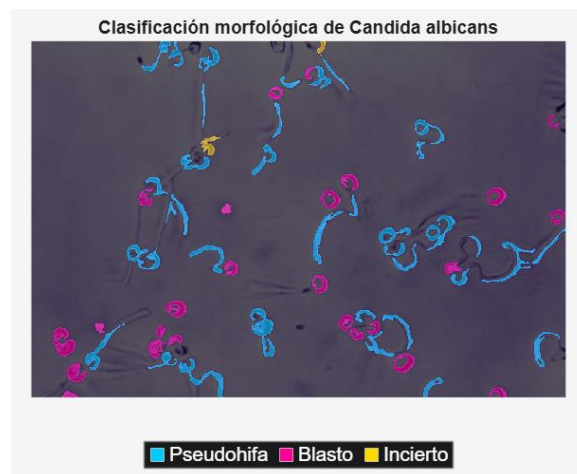


Figura 5. Resultado final en donde se muestran los pseudohifos, blastos y los inciertos clasificados

CONCLUSIONES

Mediante el flujo de procesamiento descrito, el sistema logró segmentar, medir y decidir de forma consistente la identidad morfológica de estructuras de *Candida albicans* en muestras de frotis. Los resultados muestran una clara separación entre las métricas de blastoconidios y pseudohifas, lo que indica que los descriptores elegidos (RA, circularidad, solidez) y la evidencia de Hough son apropiados para diferenciar estas formas. Así mismo, la incorporación de un margen de incertidumbre (clase "incierto") resultó útil para evitar decisiones forzadas en casos borderline, mejorando la robustez de la clasificación. En las visualizaciones, los blastoconidios fueron correctamente identificados como objetos de alta redondez, mientras que las pseudohifas se reconocieron por su elongación y alineamiento filamentoso, concordando con la interpretación esperada por un observador humano.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Biasoli, M. (2013). Candidiasis. Facultad de Bioquímica y Farmacia, Universidad Nacional de Rosario. Recuperado de http://www.fbioyf.unr.edu.ar/evirtual/file.php/118/MATERIALES_2013/TEORICOS_2013/CANDIDIASIS_2013-1.pdf
- [2] Otero Rey, E., Peñamaría Mallón, M., Rodríguez Piñón, M., Martín Biedma, B., & Blanco Carrión, A. (2015). Oral candidosis in the older patient. *Avances en Odontoestomatología*, 31(3), 135-148. <https://doi.org/10.4321/S0213-12852015000300003>
- [3] Merck Manuals. (2025). Acute myeloid leukemia (AML). En *Hematology & oncology section*. Merck Manuals Professional Edition. Recuperado el 14 de febrero de 2025 de <https://www.merckmanuals.com/professional/hematology-and-oncology/leukemias/acute-myeloid-leukemia-aml>
- [4] Pandey, A. K., Rajneesh, Pandey, R., et al. (2017). Investigating the role of global histogram equalization to improve image contrast: A medical image analysis study. *Scientific Reports*, 7, 12395. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12388-6>
- [5] Dougherty, G. (2009). *Digital image processing for medical applications*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511626659>
- [6] Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(6), 679-698. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851>
- [7] Duda, R. O., & Hart, P. E. (1972). Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Communications of the ACM*, 15(1), 11-15. <https://doi.org/10.1145/361237.361242>
- [8] Soille, P. (2003). *Morphological image analysis: Principles and applications* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05088-0>
- [9] Nour, M., Eldin, R. R., & Shoman, M. E. (2020). A hybrid technique for segmentation and classification of white blood cells using K-means and morphological operations. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 189, 105298. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2019.105298>
- [10] Rawpixel. (s.f.). *Candida albicans fungal spore* [Fotografía]. Rawpixel. <https://www.rawpixel.com/search/candida%20albicans%20fungal%20spore?page=1&path=1522&sort=curated>

**DEGRADACIÓN DE PET RESIDUAL MEDIANTE
PROCESAMIENTO HIDROTHERMAL PARA LA
OBTENCIÓN DE COMPUESTOS DE ALTO VALOR
AGREGADO**



DEGRADACIÓN DE PET RESIDUAL MEDIANTE PROCESAMIENTO HIDROTHERMAL PARA LA OBTENCIÓN DE COMPUESTOS DE ALTO VALOR AGREGADO

Eduardo Bautista-Peñuelas¹, Manuel I. Peña – Cruz², Jhoana I. De Jesús – Melchor³, Oscar M. Rodríguez Narváez³.

¹ Centro de Investigaciones en Óptica A.C. – Unidad Aguascalientes, Prol. Constitución 607, Fracc. Reserva Loma Bonita. Aguascalientes, Ags., México. C.P: 20200., ²Secihti – Centro de Investigaciones en Óptica A.C. - Unidad Aguascalientes, Prol. Constitución 607, Fracc. Reserva Loma Bonita. Aguascalientes, Ags., México. C.P: 20200., ³Dirección de investigación y soluciones tecnológicas, Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas (CIATEC), Calle Omega 201, León, Guanajuato, México, C.P. 37545.

Correo electrónico del autor de contacto: mipec@cio.mx

RESUMEN

Los métodos tradicionales de eliminación de residuos plásticos ya no cumplen con los requisitos actuales de reducción de carbono. A diferencia de las técnicas convencionales de reciclaje, una estrategia más prometedora para el aprovechamiento de plásticos desechados de PET (polietileno tereftalato) consiste en utilizarlos como materia prima mediante procesos fisicoquímicos para obtener materiales funcionales de alto valor añadido. Dentro de las alternativas sostenibles, la tecnología hidrotermal se destaca como un método ecológico, eficiente y respetuoso con el medio ambiente, que ha sido aplicado en el reciclaje y reutilización de diversos residuos plásticos. Sin embargo, una de sus principales desventajas es su elevada demanda energética. En este estudio, se propone el uso de un dispositivo hidrotermal solar (DHS) para llevar a cabo la degradación del PET. Este proceso permite la despolimerización del PET, dando lugar a la producción de ácido tereftálico (TPA), un compuesto ampliamente utilizado en la síntesis de estructuras metal-orgánicas (MOFs). Se compara la síntesis de TPA realizada mediante el DHS con la obtenida mediante métodos tradicionales de calentamiento, a fin de evaluar su viabilidad y eficiencia.

Gracias a su bajo costo, el PET residual se considera un precursor ideal para la producción a gran escala de estos materiales.

Palabras clave: Carbonización Hidrotermal; Desechos de PET; Energía solar de concentración; Análisis de ciclo de vida.

1. INTRODUCCIÓN

Los plásticos desempeñan un papel fundamental en las industrias modernas y poseen una amplia gama de aplicaciones. En 2020, la producción mundial de plásticos superó los 367 millones de toneladas métricas, lo que resalta la necesidad urgente de implementar métodos efectivos de reciclaje de residuos plásticos. Debido a su uso generalizado, cada año se generan millones de toneladas de desechos plásticos, ocasionando una importante contaminación del suelo, agua y aire [1].

La infraestructura de reciclaje para envases de PET en estado sólido, como las botellas, está bien desarrollada. Sin embargo, las fibras de PET suelen reciclarse mediante procesos mecánicos que producen artículos de menor valor, como trapos industriales, mantas de baja calidad o materiales aislantes [2]. En varios países de la Unión Europea se han implementado prohibiciones o restricciones para el depósito de plásticos en vertederos, lo que ha impulsado la búsqueda de oportunidades para incrementar las tasas de reciclaje [3].

Diversos métodos de reciclaje químico han sido estudiados, entre ellos la gasificación, hidrogenación, pirólisis, pirólisis catalítica, procesamiento hidrotermal (PHT), entre otros. Estas técnicas convierten los polímeros en petroquímicos, monómeros o aceites crudos y son consideradas soluciones tecnológicas avanzadas. Impulsado por la necesidad de sostenibilidad energética y viabilidad económica, el reciclaje químico está ganando cada vez más atención a nivel mundial. Entre estas tecnologías, el PHT destaca como un método termoquímico prometedor para convertir biomasa y otros insumos, incluidos residuos plásticos, en diferentes productos. El PHT descompone las estructuras poliméricas en fases líquidas, sólidas y gaseosas bajo

condiciones altamente reactivas, generalmente a temperaturas de 200–370 °C y presiones de 4–22 MPa, utilizando un disolvente para facilitar la reacción [4].

A altas presiones y temperaturas, el agua reduce su constante dieléctrica y densidad, volviéndose menos polar y más capaz de disolver compuestos orgánicos. Asimismo, la polaridad de la molécula de agua disminuye por la redistribución más uniforme de electrones entre el oxígeno y el hidrógeno. La mayor disociación del agua en iones H^+ y OH^- también indica que el agua caliente comprimida actúa como un medio eficaz para reacciones catalizadas por ácidos y bases. En comparación con la pirólisis, el PHT genera productos con menor contenido de oxígeno y humedad, y mayor poder calorífico [4].

Sin embargo, una de las desventajas principales de la tecnología de PHT es que requiere de altos consumos de energía. Para reducir este impacto, se ha explorado el uso de microondas como método de calentamiento en la PHT, en sustitución de los sistemas convencionales que dependen de calentadores externos. En la PHT tradicional, el calor se transfiere desde la fuente al reactor y posteriormente al medio interno por conducción [5].

Uno de los principales retos para la implementación a gran escala de la PHT es su eficiencia energética y viabilidad económica. Si bien existen diversas fuentes renovables para mitigar estos desafíos, la PHT destaca como un proceso eficaz para valorizar residuos, aunque es intrínsecamente intensivo en energía. Una estrategia para mejorar su sostenibilidad es aportar la entalpía necesaria mediante energía solar [6].

En este contexto, se propone integrar una fuente de energía renovable externa (energía solar) para reducir el consumo energético y mejorar la sostenibilidad del PHT aplicado a residuos de PET para producir ácido tereftálico (TPA). Por tanto, se compara un proceso PHT solar con un sistema convencional a escala laboratorio, con el objetivo de demostrar la factibilidad del uso de energía solar como impulsor del proceso de degradación del PET. Finalmente, se realiza un análisis de ciclo de vida (ACV) para comparar los impactos ambientales de ambos métodos de producción.

2. METODOLOGIA

2.1 PREPARACIÓN Y CARGA DEL DISPOSITIVO SOLAR

El DHS está compuesto por un plato parabólico con superficie reflectante, montado sobre una estructura de perfiles de aluminio. Esta estructura se coloca de manera que coincida con la distancia focal del plato parabólico, asegurando que la radiación solar concentrada incida en la cara frontal del soporte de aluminio ([Figura 1](#)). El sistema está instalado sobre un seguidor solar en ejes de alta precisión, lo que permite mantener la radiación solar perpendicular durante la operación del proceso PHT. El soporte del reactor está fijado a la estructura de aluminio, posicionando el reactor de manera que toda la radiación reflejada alcance la base del recipiente.



[Figura 1](#). Sistema solar hidrotermal, compuesto de un reactor de acero inoxidable fijado sobre una base en perfil de aluminio montado sobre un seguidor solar en dos ejes.

El reactor utilizado es un autoclave hidrotermal comercial de acero inoxidable AISI 316, descrito previamente [\[7\]](#). La base del recipiente se recubrió con Pyromark® 1200 [\[8\]](#). El reactor cuenta con dos termopares flexibles externos tipo K (HANNA Instruments) y uno tipo sonda (Uxcell). Por último las mediciones de temperatura se registran con un datalogger CR300® de Campbell Scientific.

La mezcla de PET y agua se introduce en el reactor, que luego se sella y se envuelve con un aislamiento térmico para reducir pérdidas de calor. La tapa consiste en un marco de fibra de vidrio

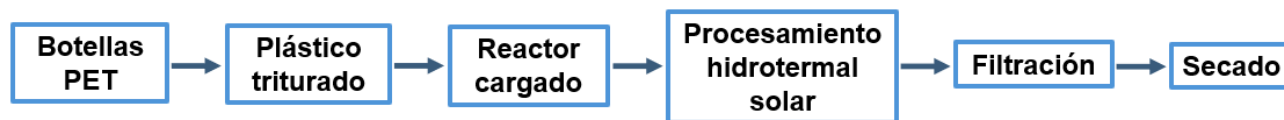
recubierto con lámina de aluminio y con una capa interna aislante. Finalmente, el reactor se fija al soporte y se conectan los termopares.

2.2 OPERACIÓN DEL PROCESO HIDROTHERMAL

El PET residual se limpió, cortó y tamizó para obtener partículas de 1 a 2 mm. Se cargaron 1.2 g de PET pretratado y 10 mL de agua desionizada en el reactor. Una vez cerrado, se montó en el seguidor solar, se conectaron los sensores y se inició el seguimiento solar. Cuando se alcanzó la temperatura objetivo, se ajustó el control solar para mantener la temperatura interna del reactor constante durante el tiempo de reacción establecido. Al terminar, se detuvo el seguimiento y el reactor se dejó enfriar a temperatura ambiente. Durante las pruebas, se midieron la irradiancia normal directa (DNI) con una estación de seguimiento solar (SOLYS2® [9]) y la velocidad del viento con un sensor de viento (Davis® [10]).

2.3 RECUPERACION DE PRODUCTOS (HIDROCHAR SOLIDO)

Una vez enfriado, el reactor se retiró del soporte, se ventiló el gas y los productos sólidos y líquidos se recolectaron en tubos rotulados. Las muestras se filtraron con embudos de vidrio y filtros Whatman No. 42 (15 µm), lavadas con agua desionizada y secadas a 80 °C durante 2 horas en un horno ON-01E (Lab Companion®). Posteriormente, el material se molió en mortero y se almacenó para su caracterización. La [Figura 2](#) resume este procedimiento.



[Figura 2](#). Esquema de operación del DHS.

2.4 PROCESO HIDROTHERMAL EN LABORATORIO

El PET residual se preparó de forma similar (limpieza, corte y tamizado). Las partículas se cargaron en recubrimientos de reactor de 25 mL (1.2 g PET y 10 mL de agua por cada uno), que se sellaron e introdujeron en un reactor de acero inoxidable, colocado en una mufla a 200 °C por 24 horas. Tras el tratamiento, el reactor se enfrió, se abrió y se filtraron los productos siguiendo el mismo procedimiento de secado y molienda descrito anteriormente (Figura 3).

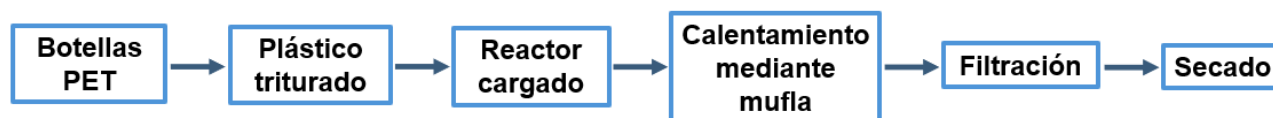


Figura 3. Esquema de operación de la mufla para la PHT del PET bajo condiciones de laboratorio.

2.5 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)

El estudio incluyó un ACV para cuantificar los impactos ambientales del proceso hidrotermal solar aplicado al reciclaje de PET, comparándolo con el método de laboratorio presentado anteriormente. La unidad funcional se definió como el procesamiento de 1 kg de PET residual, para lo cual los datos experimentales (1.2 g por ciclo) se extrapolaron a 833 ciclos.

El análisis se centró en estimar emisiones de CO₂ y huella de gases de efecto invernadero (GEI). Se incluyeron todas las etapas del proceso (excepto infraestructura y tratamiento de aguas). El ACV se realizó en openLCA [11], empleando el método ReCiPe 2016 para evaluar el efecto del proceso sobre la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) [12]. Se asumió que el transporte del PET no es relevante, dado el bajo volumen procesado y su amplia distribución geográfica. Cabe señalar que los procesos dependientes de electricidad tienden a tener un mayor consumo energético, lo que reduce su competitividad. El análisis de estrategias energéticas alternativas quedó fuera del alcance de este estudio.

2.6 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) se empleó para caracterizar los grupos funcionales presentes en la superficie de los materiales obtenidos. Los espectros se obtuvieron utilizando un sistema Thermo Scientific Smart iTR Nicolet iS10 equipado con un cristal de diamante, en el rango de número de onda de 4000 a 600 cm^{-1} .

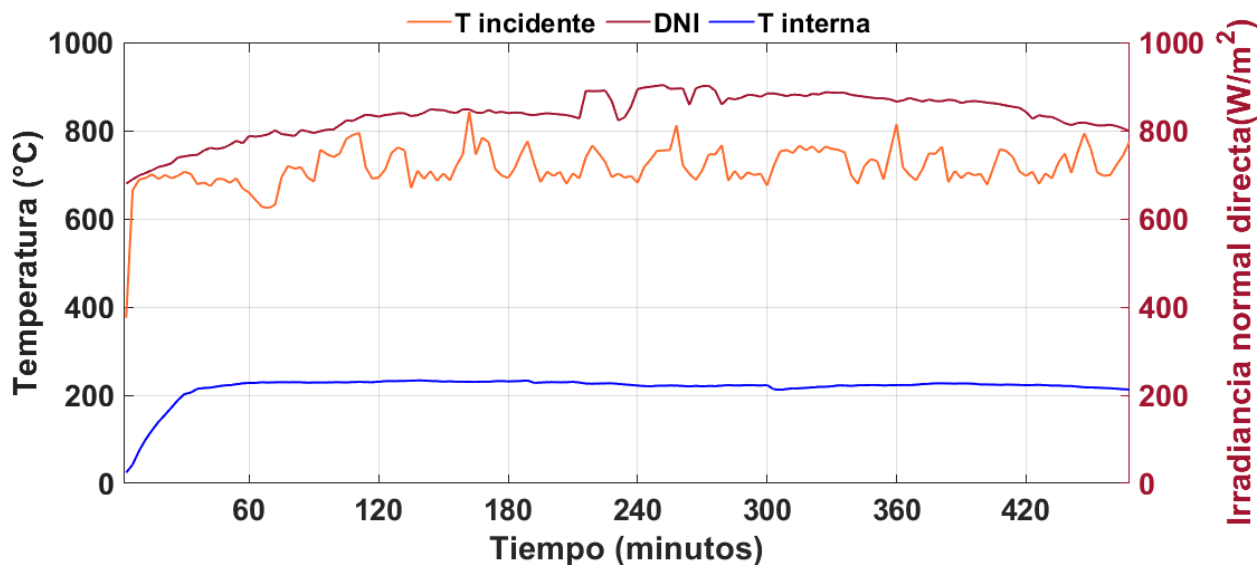
3. ANALISIS Y RESULTADOS

La sección de Resultados presenta los hallazgos de la campaña experimental realizada con el DHS. En primer lugar, se analizan las condiciones de las muestras procesadas con el DHS para evaluar los parámetros de calentamiento durante las pruebas. Posteriormente, se lleva a cabo una caracterización de los materiales obtenidos. Finalmente, se realiza un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de los diferentes experimentos desarrollados en este estudio.

3.1. DESEMPEÑO OPERATIVO

Las condiciones de las muestras sometidas a 8 horas de tiempo de operación se muestran en la [Figura 4](#). T interna representa la temperatura interna del reactor, la cual se mantuvo homogénea durante todo el tiempo de reacción para esta muestra ([Figura 4 a](#)). Las condiciones de DNI y la temperatura en el punto focal se mantuvieron constantes, con valores superiores a 600 °C durante todo el proceso. En este caso, las condiciones diurnas permitieron una temperatura interna estable cercana a 200 °C. Estos valores pueden regularse ajustando el aislamiento térmico del reactor.

a)



b)

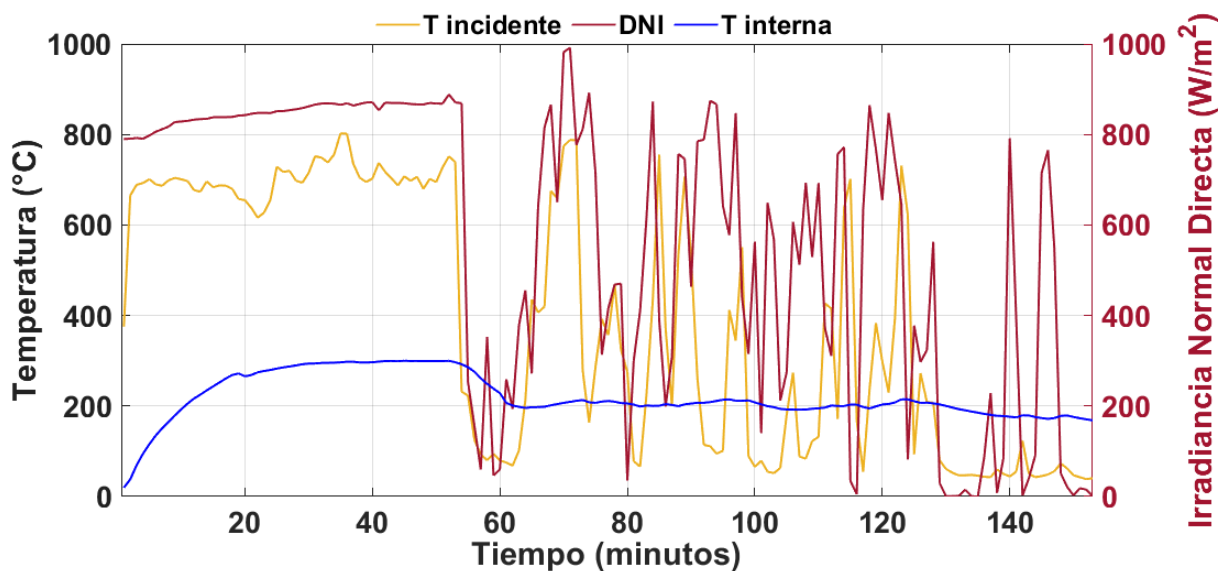


Figura 4. Condiciones de temperatura para pruebas de 8 horas de tiempo de operación realizadas sobre el dispositivo hidrotermal solar. a) Prueba realizada bajo condiciones de cielo despejadas (Altos valores de DNI). b) Prueba realizada bajo condiciones de cielo adversas (bajos valores de DNI).

T incidente representa la temperatura incidente en el reactor, que permaneció relativamente estable. Las pequeñas fluctuaciones se atribuyen al viento, retrasos en la respuesta de los

sensores y ajustes manuales para mantener la T interna constante. Mantener estable la temperatura interna se vuelve más complejo en condiciones de baja DNI (por ejemplo, días nublados, [Figura 4 b](#)).

Para lograr altos rendimientos de TPA a partir de la degradación de residuos plásticos de PET, se deben cumplir varias condiciones: temperatura, presión, relación PET/agua y tiempo efectivo de reacción (tiempo después de alcanzar el estado estacionario). Las condiciones óptimas reportadas son 250 °C, 39–40 bar, relación PET/agua 1:10 y 30 min de reacción efectiva. Tiempos insuficientes bajo estos parámetros producen TPA con oligómeros residuales [13]. Tanto los resultados experimentales como la literatura indican que los tiempos cortos son preferibles para maximizar rendimiento y calidad, lo que se ajusta a las tecnologías solares que concentran energía en periodos reducidos [14]. Por el contrario, tiempos prolongados (como el ensayo de 8 h) dieron menores rendimientos y material parcialmente carbonizado, lo que sugiere que un exceso de energía puede degradar el producto. La presión del reactor alcanzó fácilmente los 39–40 bar, manteniéndose en el rango de 1–5 MPa (10–50 bar) en todas las pruebas, correlacionadas con las temperaturas. Esto resalta el efecto de las condiciones climáticas en experimentos largos. Factores como temperatura ambiente elevada o baja humedad relativa también afectan la DNI y la disponibilidad solar. Si bien la DNI es clave para seleccionar sitios de plantas solares, no debe analizarse de manera aislada [15]. En países como México, la temporada de lluvias puede reducir significativamente la DNI, aun con alto potencial solar. Por ello, emplear tiempos de reacción cortos puede ayudar a maximizar la energía incidente y mejorar las condiciones del proceso.

3.2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL OBTENIDO

La [Figura 5](#) muestra los espectros infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR) de la transformación del PET. En el PET inicial, aparecen señales en 2934–2856 cm^{-1} y una banda intensa en 1713 cm^{-1} , además de señales en 1242 y 1094 cm^{-1} . Tras el tratamiento hidrotérmico solar, desaparecen las bandas de éster, indicando la ruptura de estos enlaces. Surgen dos bandas nuevas en 1135 y 1110 cm^{-1} , atribuibles al estiramiento simétrico y asimétrico de grupos carbonilo

dobles características del TPA. Se puede observar que el HTP-C reproduce fielmente las señales características del TPA, lo que confirma la despolimerización efectiva del PET.

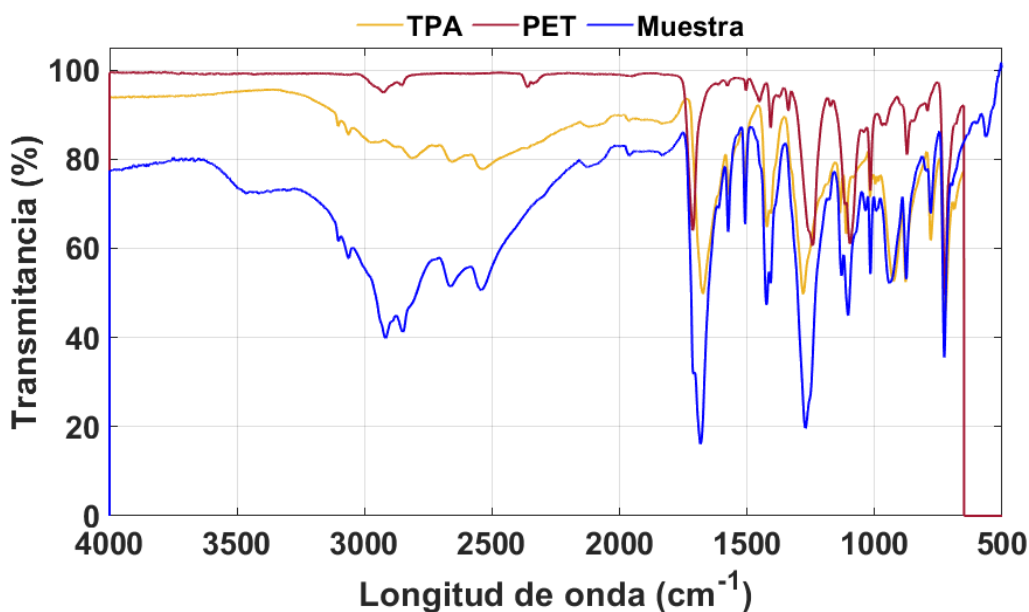


Figura 5. FTIR de una muestra realizada con el procesamiento hidrotérmico solar en contraste con una señal dada de una muestra de PET además de una señal dada por una muestra de TPA.

Aparecen además bandas en 3103 y 3063 cm^{-1} y una nueva en 1676 cm^{-1} . Las señales del anillo aromático (1408 y 870 cm^{-1}) permanecen, evidenciando que la estructura bencénica se conserva. La muestra presenta una banda ancha entre $3300\text{--}2500\text{ cm}^{-1}$ atribuible al estiramiento O–H de los ácidos carboxílicos, la cual está ausente en el PET. Además, las intensas absorciones C–O–C asociadas al enlace éster en el PET ($1240\text{--}1120\text{ cm}^{-1}$) desaparecen en el HTP-C, siendo reemplazadas por una señal a 1260 cm^{-1} correspondiente al estiramiento C–O de los ácidos carboxílicos. Esto confirma la formación de ácido tereftálico como producto principal. El espectro del material tratado por el tratamiento solar es similar al del TPA comercial, con ligeras diferencias en intensidad y definición de bandas, posiblemente por aromatización parcial o carbonización debido a la intensidad del tratamiento solar.

3.3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)

El método hidrotermal convencional usa una mufla eléctrica para llevar a cabo el procesamiento hidrotermal, mientras que el proceso hidrotermal solar opera sobre un seguidor solar el cual es operado con diferentes tiempos de reacción.

El procesamiento hidrotermal solar de menor tiempo (2 horas) reduce las emisiones de GEI hasta en un 86 % frente al método convencional, siendo el proceso solar que genera menos emisiones de GEI (Tabla I). Los mayores impactos para todos los tratamientos involucrados provienen del consumo eléctrico. Todas las variantes incluyen un paso de secado final que consume mucha electricidad. Sustituir esta etapa por tecnologías solares de secado o por convección natural podría reducir las emisiones totales en todos los tratamientos [16].

Proceso	GEI (Emisiones de CO ₂), kg CO ₂ Eq
Hidrotermal por mufla	9717.29
Hidrotermal solar (2 horas)	1329.18
Hidrotermal solar (4 horas)	1607.56
Hidrotermal solar (8 horas)	2164.31

Tabla I. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para los tratamientos realizados.

Una limitación del ACV es que se basa en procesos a escala laboratorio y no considera la separación y segregación previa de los residuos ni tampoco el procesamiento ni el uso final del TPA. A escala industrial, se requeriría optimizar equipos y separación de residuos. No obstante, el estudio confirma la viabilidad técnica de usar energía solar concentrada con un seguimiento en dos ejes para lograr las temperaturas necesarias, con potencial de escalamiento si se optimizan las operaciones necesarias.

4. CONCLUSIONES

En este estudio, se integró un seguidor solar en dos ejes equipado con un concentrador parabólico y un reactor hidrotermal por lotes, para permitir el tratamiento de residuos plásticos mediante procesamiento hidrotermal. El sistema proporcionó las temperaturas y presiones necesarias para

lograr la conversión del plástico en TPA. Las variaciones en la DNI durante los diferentes tiempos de reacción influyeron directamente en la calidad de los productos obtenidos.

El TPA producido exitosamente mediante el sistema hidrotermal solar se encuentra en una forma relativamente pura, las señales del FT-IR coinciden con el del TPA estándar, así como los grupos funcionales identificados. Se detectaron impurezas menores, probablemente debido a una carbonización parcial.

Los resultados del ACV mostraron que en el esquema de producción solar se reducen las emisiones de GEI aproximadamente un 86% en comparación con el método tradicional de mufla, siendo el tratamiento de 2 horas el que presentó las emisiones más bajas entre los procesos asistidos por energía solar. Estos hallazgos destacan el bajo consumo de electricidad y las reducidas emisiones del sistema, lo que sugiere que este dispositivo solar podría ser una opción viable para el tratamiento de residuos plásticos a mayor escala en el futuro.

5. AGRADECIMIENTOS

La investigación reportada en esta publicación fue financiada por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) a través de la Convocatoria de Ciencia Básica y de Frontera 2025, con número de apoyo: CBF-2025-G-1634. Adicionalmente, por el Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética mediante el rubro 207450 - Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol), dentro del Proyecto Estratégico No. 120.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Čolnik, M., Pečar, D., Knez, Ž., Goršek, A., & Škerget, M. (2022). Kinetics study of hydrothermal degradation of pet waste into useful products. *Processes*, 10(1).

<https://doi.org/10.3390/pr10010024>

[2] Muthukumar, K., & Kasiraman, G. (2023). Downcycling of one-time used plastic waste to DICl engine combustion energy through pyrolysis with less NOx emission. *Process Safety and Environmental Protection*, 175, 744–752.

<https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.05.097>

[3] Darzi, R., Dubowski, Y., & Posmanik, R. (2022). Hydrothermal processing of polyethylene-terephthalate and nylon-6 mixture as a plastic waste upcycling treatment: A comprehensive multi-phase analysis. *Waste Management*, 143, 223–231.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.03.002>

[4] Liu, Y., Chandra Akula, K., Phani Raj Dandamudi, K., Liu, Y., Xu, M., Sanchez, A., Zhu, D., & Deng, S. (2022). Effective depolymerization of polyethylene plastic wastes under hydrothermal and solvothermal liquefaction conditions. *Chemical Engineering Journal*, 446.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137238>

[5] Sharma, H. B., Sarmah, A. K., & Dubey, B. (2020). Hydrothermal carbonization of renewable waste biomass for solid biofuel production: A discussion on process mechanism, the influence of process parameters, environmental performance and fuel properties of hydrochar. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 123). Elsevier Ltd.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109761>

[6] Chater, H., Asbik, M., Koukouch, A., Mouaky, A., Zakariae, O., & Sarh, B. (2024). Energy and exergy analysis of an innovative solar system for hydrothermal carbonization process using photovoltaic solar panels. *Renewable Energy*, 231. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120964>

[7] Bautista-Peñuelas, E., Pineda-Arellano, C. A., Moreno-Pérez, J., Villafán-Vidales, H. I., Arcelus-Arriaga, P., & Peña-Cruz, M. I. (2025). Evaluation of thermal source in the yield of a hydrothermal liquefaction batch reactor. *Applied Thermal Engineering*, 268.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125891>

[8] Tempil. Accurate indication. Reliable results. Product data: Pyromark 1200 flat black. [Online]. Available: https://www.royalsupply.com/store/pc/catalog/Tempil/TDS_Pyromark_1200F.pdf [Accessed July 14, 2024].

[9] KIPP and ZONEN, Hydromet. SOLYS2 Sun Tracker. [Online]. Available at: <https://www.kippzonen.com/Product/20/SOLYS2-Sun-Tracker> [Accessed January 16, 2025].

[10] HOBO. Davis® Wind Speed and Direction Smart Sensor. [Online]. Available at: https://www.onsetcomp.com/products/sensors/s-wcf-m003?srsftid=AfmBOopnMJyg-4Ctan2kA2eSzm7eWo6aeGWjOPJI1sY_h2RiCigfphBA [Accesed January 16, 2025].

[11] Greendelta OpenLCA. Alt Moabit 130, 10557 Berlin Germany. OpenLCA software. Recovery date: 25/march/2025; Recovery from: <https://www.openlca.org>

[12] Masoumi, S., & Dalai, A. K. (2021). Techno-economic and life cycle analysis of biofuel production via hydrothermal liquefaction of microalgae in a methanol-water system and catalytic hydrotreatment using hydrochar as a catalyst support. *Biomass and Bioenergy*, 151. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106168>

[13] Valh, J. V., Vončina, B., Lobnik, A., Zemljič, L. F., Škodič, L., & Vajnhandl, S. (2020). Conversion of polyethylene terephthalate to high-quality terephthalic acid by hydrothermal hydrolysis: the study of process parameters. *Textile Research Journal*, 90(13–14), 1446–1461. <https://doi.org/10.1177/0040517519893714>

[14] Rahman, T., Jahromi, H., Roy, P., Bhattarai, A., Ammar, M., Baltrusaitis, J., & Adhikari, S. (2023). Depolymerization of Household Plastic Waste via Catalytic Hydrothermal Liquefaction. *Energy & Fuels*, 37(17), 13202–13217. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c01706>

[15] Kumar, S., Agarwal, A., & Kumar, A. (2021). Financial viability assessment of concentrated solar power technologies under Indian climatic conditions. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100928>

[16] Kamarulzaman, A., Hasanuzzaman, M., & Rahim, N. A. (2021). Global advancement of solar drying technologies and its future prospects: A review. In *Solar Energy* (Vol. 221, pp. 559–582). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.056>

ESPECTROSCOPIA ÓPTICA APLICADA AL DIAGNÓSTICO NO INVASIVO DEL ESTADO FOLIAR DE HOJAS DE FRESA



ESPECTROSCOPIA ÓPTICA APLICADA AL DIAGNÓSTICO NO INVASIVO DEL ESTADO FOLIAR DE HOJAS DE FRESA

Diana Paulina Moreno Miranda ¹, Oleksiy Shulika ²

¹Universidad de Guanajuato, ²Universidad de Guanajuato

dp.morenomiranda@ugto.mx

RESUMEN

La fotónica agrícola ofrece nuevas estrategias para la evaluación no destructiva de la salud vegetal. En esta ponencia se presenta una metodología experimental basada en espectroscopía óptica para identificar variaciones fisiológicas en hojas de *Fragaria × ananassa* (fresa). Se trabajó con tres grupos foliares: sanas, enfermas y deshidratadas. Mediante un sistema semi-portátil de medición, se obtuvieron espectros de reflectancia y transmitancia en el rango visible y parte del infrarrojo cercano (450–750 nm). El análisis se enfocó en la extracción de parámetros ópticos sensibles a cambios pigmentarios y estructurales, destacando índices espectrales como el de enfermedad y deshidratación. Estos índices permitieron diferenciar los estados foliares con base en su respuesta espectral, lo cual evidencia la sensibilidad del método a alteraciones en la clorofila y contenido hídrico. Los resultados sugieren que esta técnica puede utilizarse para monitoreo en tiempo real en campo, con aplicaciones en agricultura de precisión, manejo de estrés hídrico y detección temprana de enfermedad debido al cambio de color en las hojas.

Palabras clave: Espectroscopía, fotónica agrícola, índice espectral, fresa.

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de fresa (*Fragaria × ananassa*) es de gran relevancia en México, destacando Guanajuato como uno de los principales estados productores y exportadores. Su importancia económica y social es considerable, ya que este fruto genera empleo y aporta significativamente al sector agroalimentario. Sin embargo, la productividad del cultivo enfrenta serias limitaciones debido a enfermedades foliares y condiciones de estrés hídrico, que afectan la calidad y cantidad de la producción [1].

Los métodos convencionales de diagnóstico, como la inspección visual y los análisis de laboratorio, suelen ser tardados, invasivos y costosos. Esto dificulta la detección temprana de problemas, reduciendo la eficacia en la toma de decisiones en campo. Ante este reto, la fotónica agrícola ha emergido como una herramienta prometedora. En particular, la espectroscopía óptica permite monitorear de forma no invasiva parámetros fisiológicos de las plantas, como el contenido de clorofila y el estado hídrico, lo que la convierte en una alternativa práctica y sostenible [2].

El presente trabajo tiene como objetivo presentar y validar una metodología espectroscópica aplicada a hojas de fresa, orientada a diferenciar entre estados foliares sanos, enfermos y

deshidratados. Con ello, se busca avanzar hacia métodos accesibles, rápidos y de bajo impacto ambiental para la agricultura de precisión [3].

METODOLOGIA

1.1 Material vegetal

Se recolectaron hojas de fresa clasificadas en tres grupos de acuerdo con su condición fisiológica [figura 1](#):

- **Sanas:** hojas verdes sin daños visibles.
- **Enfermas:** hojas con manchas o amarillentas.
- **Deshidratadas:** hojas expuestas a condiciones de sequía controlada.



[Figura 1.](#) Tipos de hojas medidas y como se ven en apariencia y coloración.

Las hojas fueron medidas sin ningún tipo de tratamiento, para asemejarse más a sus condiciones naturales, se encuentran en un ambiente controlado donde la iluminación y el riego van a depender de la temperatura donde se encuentre el lugar las hojas se acomodaron bajo un arreglo de dos fibras ópticas y un adaptador de fibras sobre una base diseñada en 3D como se observa en la [figura 2](#).

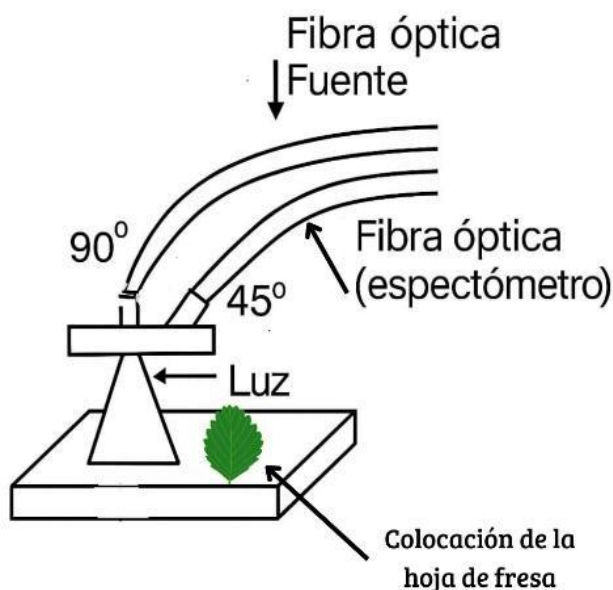


Figura 2. Arreglo de reflectancia utilizado, donde se utilizó ese ángulo para garantizar la replicabilidad de las mediciones.

1.2 SISTEMA EXPERIMENTAL

Se utilizó un espectrómetro semi-portátil que aparece en la **figura 3** operando en el rango de 450–750 nm. Las mediciones se realizaron bajo condiciones controladas de iluminación, registrando la **reflectancia**.

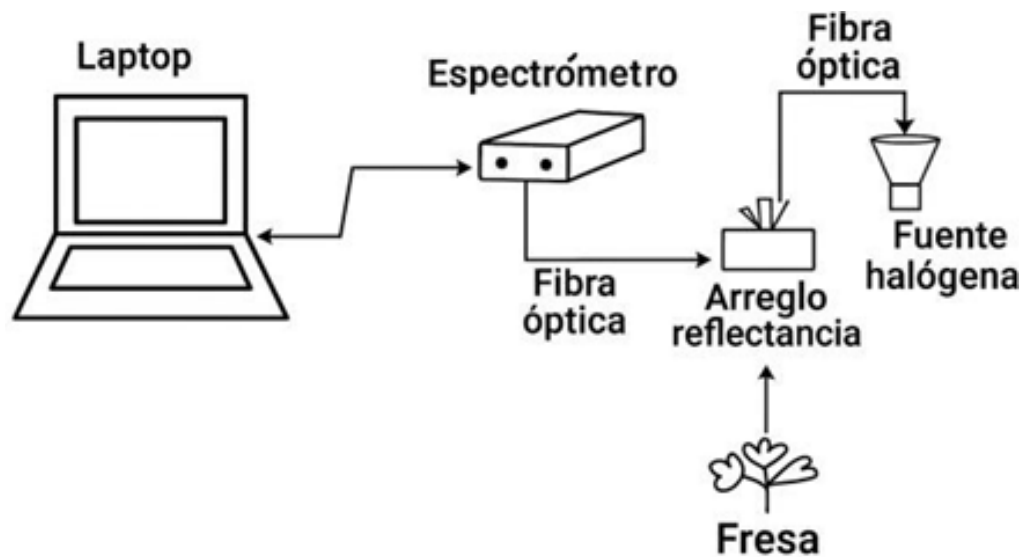


Figura 3. Sistema experimental completo.

1.1 PROCESAMIENTO DE DATOS:

Los espectros fueron suavizados con el filtro de Savitzky–Golay y posteriormente normalizados. Para reducir la dimensionalidad y resaltar patrones. Asimismo, se calcularon índices espectrales de salud y deshidratación siguiendo la lógica de parámetros conocidos, como el índice de borde rojo (REI), sensible a variaciones en el contenido de clorofila [4].

ANÁLISIS Y RESULTADOS

Las hojas de fresa en las diferentes condiciones mencionadas en la parte metodológica arrojan espectros con cambios notables entre cada estado como en la [figura 4](#).

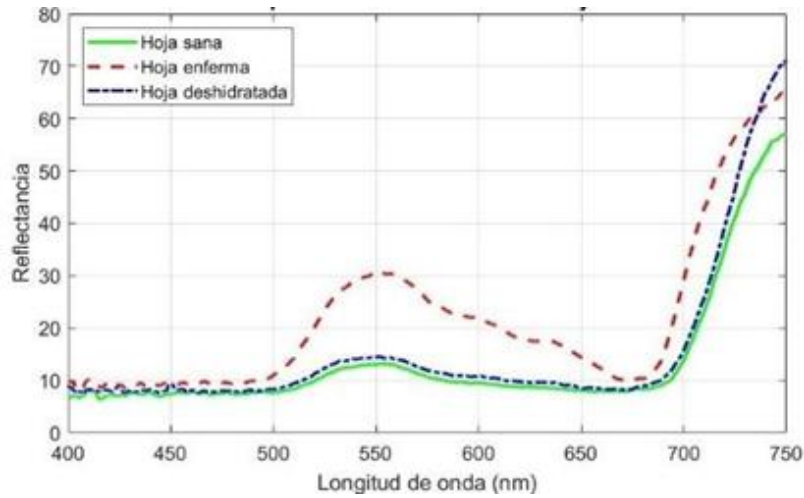


Figura 4. Espectros típicos obtenidos de los tres tipos de hojas se ve claramente que entre la hoja sana y la deshidratada es muy poco evidente el cambio, lo que se atribuye a que la hoja solo perdió agua, pero su color sigue siendo el verde.

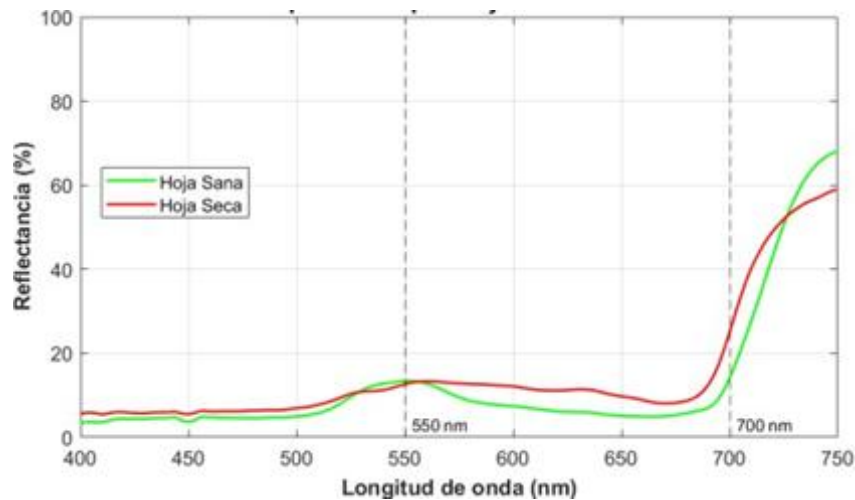


Figura 5. Espectros típicos entre una hoja sana y una totalmente deshidratada, en este caso la hoja tenía completa deshidratación y hay un evidente cambio entre los 550 nm y los 700 que aun usando el visible es notorio.

En términos fisiológicos, las hojas enfermas presentaron una reducción en el contenido de clorofila, lo que se reflejó en cambios en las regiones verde y roja del espectro, particularmente en la disminución de absorción alrededor de 670 nm. Las hojas deshidratadas mostraron un aumento en la reflectancia y una pérdida de absorción, lo que evidencia la sensibilidad del método a variaciones en el agua foliar [figura 4 y 5](#). Por su parte, las hojas sanas sirvieron como referencia estable, manteniendo el perfil espectral característico de alta absorción en el azul y el rojo, y mayor reflectancia en la región verde y en el borde rojo.

Índice óptico de enfermedad vegetal e índice de estrés hídrico avanzado.

Estos índices fueron creados en base a sus cambios relevantes y similitudes en sus longitudes de onda entre los más de 325 espectros analizados índice óptico de enfermedad vegetal (IOEV) e índice estrés hídrico avanzado (IEHA), la [figura 6](#) muestra solamente la distribución del índice IOEV en 20 hojas y la [figura 7](#) la distribución en 20 hojas también para el de estrés hídrico.

$$IOEV = \frac{R_{550} - R_{670}}{R_{670} + R_{750}}$$

$$IEHA = \frac{R_{700} - R_{550}}{R_{700} + R_{550}}$$

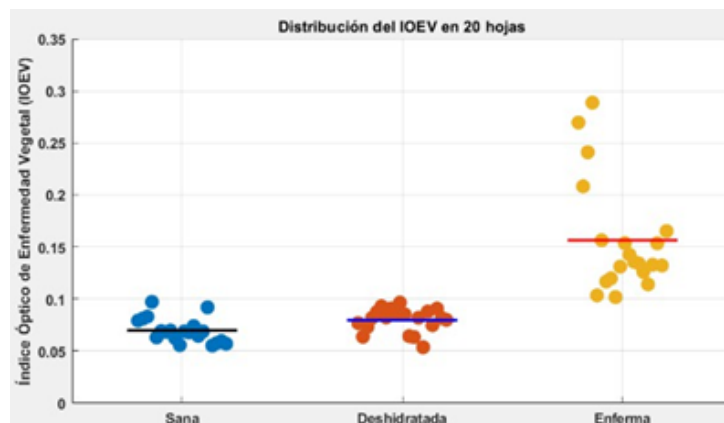


Figura 6. Espectros de distribución de solo 20 hojas, donde se muestran los promedios de las mediciones, en el promedio de la sana con deshidratada con este índice es muy poco evidente el cambio entre sana y deshidratada.

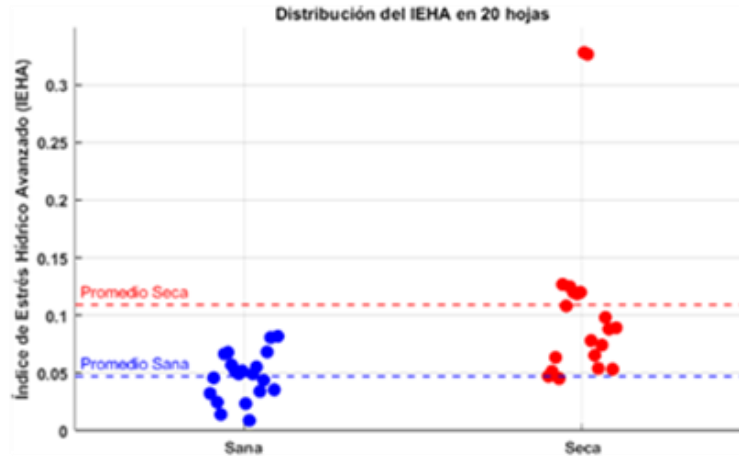


Figura 7. Espectros de distribución de solo 20 hojas, donde se muestran los promedios de las mediciones de la deshidratación extrema y la separación entre el promedio de sana y seca es más evidente.

Estos resultados confirman que la espectroscopía óptica es capaz de detectar diferencias sutiles entre estados fisiológicos de las hojas, en especial el índice IOEV cumple con el propósito de diferenciar entre hoja entre hojas enfermas y sanas por el cambio de coloración pero en el estrés hídrico es poco eficiente, por esa razón se elaboró otro índice que si pudiera hacer una clara diferencia al escoger las longitudes de onda de 550 y 700 la última principalmente que nos arroja información acerca de la deshidratación. A diferencia de los diagnósticos visuales tradicionales, el método propuesto permite cuantificar los cambios de manera objetiva, rápida y no invasiva, lo cual constituye una ventaja para aplicaciones en agricultura de precisión y monitoreo en campo.

CONCLUSIONES

La espectroscopía óptica permite diferenciar estados foliares de fresa de forma no invasiva. Se validaron índices espectrales asociados a enfermedad y deshidratación. Este trabajo tiene aplicación en la agricultura de precisión, monitoreo en campo y detección temprana. En el futuro se prevé su integración con sistemas IoT y algoritmos de clasificación automática.

BIBLIOGRAFÍA

[1]Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2021). *La fresa, fruto emblemático de México.* Gobierno de

México.

[2]Peñuelas, J., & Filella, I. (1998). Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends in Plant Science*, 3(4), 151–156.

[3]Thenkabail, P. S., Smith, R. B., & De Pauw, E. (2000). Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 71(2), 158–182.

[4]Gitelson, A., & Merzlyak, M. N. (1994). Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 22(3), 247–252.

**SISTEMAS ACUOSOS BIFÁSICOS COMO
ALTERNATIVA ECÓLOGICA PARA DISMINUIR LA
CONCENTRACIÓN DE FENOLFTALEÍNA PRESENTE
EN RESIDUOS DE LABORATORIO: ESTUDIO
PRELIMINAR**



SISTEMAS ACUOSOS BIFÁSICOS COMO ALTERNATIVA ECOLÓGICA PARA DISMINUIR LA CONCENTRACIÓN DE FENOLFTALEÍNA PRESENTE EN RESIDUOS DE LABORATORIO: ESTUDIO PRELIMINAR

Braulio Paul Castro Gallardo¹, Diana Esmeralda Martínez Rodríguez¹, Mario Ávila Rodríguez².

¹División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.

²Departamento de Química. División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato,
Universidad de Guanajuato.

Correo electrónico del autor de contacto: bp.castrogallardo@ugto.mx

RESUMEN

Se aplicaron sistemas acuosos bifásicos (SAB) como estrategia sostenible para la concentración de fenolftaleína (PhPh) en medio alcalino, simulando residuos líquidos de laboratorio. Se emplearon sistemas conformados por Polietilenglicol 1000 g/mol combinado con citrato de sodio o sulfato de sodio y soluciones sintéticas de PhPh (10 ppm en NaOH 0.05 M). Mediante espectrofotometría UV-Vis se determinó la distribución del analito. Ambos SAB mostraron eficiencias de extracción > 90 % hacia la fase polimérica, atribuibles al efecto *salting-out*. El sistema con citrato de sodio fue más eficiente debido a la mayor concentración salina que favoreció la migración del analito. Adicionalmente, se identificó la posible degradación de la PhPh en medio alcalino y en las fases poliméricas, evidenciada por la disminución de la absorbancia y del color rosado. No obstante, las fases ricas en PEG ofrecieron mayor estabilidad frente a procesos de hidrólisis u oxidación. Estos resultados destacan el doble papel de los SAB: no solo como medio eficiente de concentración, sino también como posible entorno de protección frente a su degradación, aportando valor como herramienta de preservación temporal de compuestos sensibles. En conclusión, los SAB estudiados permiten concentrar y estabilizar eficientemente la PhPh, optimizando el manejo de residuos y ampliando su aplicabilidad.

Palabras clave: Fenolftaleína (PhPh); Sistemas Acuoso Bifásicos (SAB); Degradación; Estabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

La fenolftaleína (PhPh) es un compuesto orgánico ampliamente conocido por su uso como indicador ácido-base. Su aplicación en pruebas químicas es fundamental debido a su capacidad de evidenciar cambios de pH mediante un cambio cromático característico. En medio ácido a neutro, tiene una transición de color característica en medios alcalinos (pH aproximado de 8.2 - 10) debido a la formación de la especie quinonoide (la cual presenta un color rosa intenso a rojo), por arriba de pH 12 pierde el color de nuevo debido a un fenómeno llamado “decoloración alcalina”. Este cambio de coloración se debe a la ionización de los grupos fenólicos y a la formación de un sistema conjugado extendido que absorbe en la región visible [1]. Específicamente, la forma quinonoide es químicamente inestable en condiciones básicas prolongadas, degradándose irreversiblemente y perdiendo su coloración, lo que limita su utilidad en aplicaciones analíticas e industriales donde la estabilidad es crucial [2].

En gran medida la PhPh se utiliza como indicador o reactivo en laboratorios. En la antigüedad fue utilizado como laxante, pero actualmente no se recomienda su uso en farmacología ya que hay estudios que han demostrado que puede ser potencialmente carcinógeno y mutagénico, puede causar irritación en piel, ojos y vías respiratorias [3]. El manejo de la PhPh también plantea un desafío ambiental. Los laboratorios académicos generan residuos líquidos con compuestos orgánicos potencialmente tóxicos, como la fenolftaleína (PhPh), lo que resalta un desafío ambiental en cuanto a su tratamiento y disposición. En este contexto, el desarrollo de estrategias sostenibles se vuelve prioritario.

Ante esta problemática, este proyecto propone el uso de sistemas acuosos bifásicos (SAB) como una alternativa ecológica para la extracción de solutos de interés, pues los (SAB) no generan subproductos tóxicos para el medio ambiente, a diferencia de otros métodos reportados. Los SAB están generalmente formados por dos fases acuosas inmiscibles, comúnmente compuestos por polímeros y sales, aunque también pueden combinar otro tipo de compuestos. Se caracterizan por ser medios suaves, altamente hidratados (o cual los vuelve biocompatibles), permiten la partición

selectiva de solutos y ofrecen un ambiente protector que puede mejorar la estabilidad de especies reactivas [4]. Este trabajo presenta un estudio preliminar sobre la aplicación de SAB para la concentración de PhPh en medio acuoso alcalino, simulando una muestra sintética proveniente de residuos de laboratorio. Con ello, se busca evaluar la viabilidad de estos sistemas como una estrategia sustentable para el manejo de residuos de compuestos orgánicos potencialmente tóxicos.

2. METODOLOGIA

2.1 Preparación de la muestra problema (MP).

Se preparó una disolución de PhPh (analito) en hidróxido de sodio (NaOH) 0.05 M, asegurando su completa disolución para obtener una concentración conocida (10 ppm) de la especie quinonoide coloreada.

2.2. Preparación de los sistemas acuosos bifásicos (SAB) y proceso de extracción de la PhPh.

En la [Figura 1](#), se representa el proceso para la preparación de los SAB y la extracción PhPh.

Se formaron dos sistemas acuosos bifásicos (SAB) con la siguiente composición [5]:

SAB 1: Polietilenglicol (PEG-1000 g/mol) como polímero, citrato de sodio como sal y la disolución de PhPh en NaOH 0.05 M como medio acuoso.

SAB 2: Polietilenglicol (PEG-1000 g/mol) como polímero, sulfato de sodio como sal y la disolución de PhPh en NaOH 0.05 M como medio acuoso.

Cada sistema SAB se sometió a agitación constante para garantizar una homogenización completa de los reactivos. Posteriormente, las mezclas se dejaron en reposo durante 24 horas para permitir la separación y equilibrio completo de las fases. Así, se obtuvieron:

- La **fase polimérica (FP)**, rica en PEG.
- La **fase salina (FS)**, rica en sal.

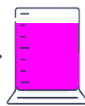
SAB 1: PEG-1000/Citrato de sodio

Composición:

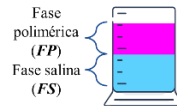
- % p/p Polietilenglicol 1000 g/mol
- % p/p Citrato de sodio
- % p/p PhPh 10 ppm en NaOH 0.05 M



Homogenizar



Reposar 24 horas.



SAB 2: PEG-1000/Sulfato de sodio

Composición:

- % p/p Polietilenglicol 1000 g/mol
- % p/p Sulfato de sodio
- % p/p PhPh 10 ppm en NaOH 0.05 M



Homogenizar



Reposar 24 horas.

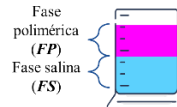


Figura 1. Proceso de preparación de SAB y extracción de PhPh.

2.3. Cuantificación y caracterización de PhPh mediante espectroscopia UV-Vis.

La cuantificación y caracterización de PhPh en medio acuoso alcalino, así como en las fases poliméricas, se llevó a cabo mediante espectroscopía UV-Vis (Figura 2). Se prepararon soluciones estándar en un rango de 1 a 10 ppm en los medios correspondientes, las cuales se midieron en su máxima absorbancia característica de la forma coloreada (quinonoide) (~553 nm) utilizando un espectrofotómetro UV-Vis (Marca: Varian, Modelo: Cary 50 Probe) equipado con una celda de cuarzo de 1 cm de camino óptico. Las muestras problema se analizaron bajo las mismas condiciones experimentales. La concentración de PhPh en cada caso se determinó por interpolación de su absorbancia en la curva de calibración respectiva. Todas las mediciones incluyeron su blanco correspondiente.

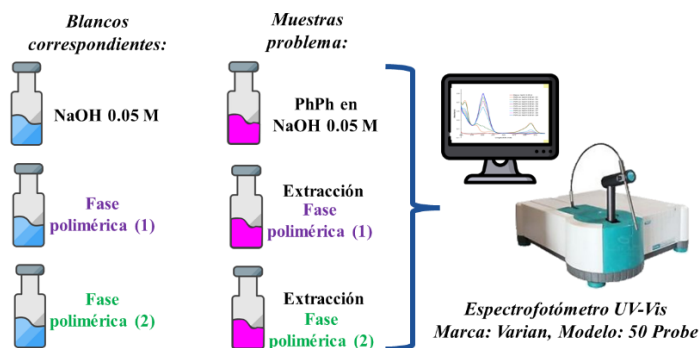


Figura 2. Cuantificación y caracterización de PhPh mediante espectroscopia UV-Vis.

2.4. Determinación de pH del medio al inicio y al final del análisis.

El pH de cada fase polimérica y de la muestra problema se midió utilizando un potenciómetro calibrado (Marca: Metrohm, Modelo: 913 pH Meter) previamente con soluciones tampón de referencia, garantizando la precisión de las mediciones.

3. ANALISIS Y RESULTADOS

3.1. Eficiencia de la extracción de PhPh utilizando sistemas acuosos bifásicos.

La extracción global de PhPh en ambos SAB supera el 90 % (Tabla I), lo que posiciona a los sistemas SAB como herramientas prometedoras para la recuperación eficiente de especies sensibles como la forma quinonoide de la PhPh.

Tabla I. Porcentajes de extracción de PhPh en una sola etapa en cada SAB.

SAB	% Extracción	Desviación estándar
PEG-1000/Citrato de sodio	95.66 %	1.67
PEG-1000/Sulfato de sodio	92.73 %	1.92

La diferencia entre el sistema PEG-1000/citrato de sodio y PEG-1000/sulfato de sodio, aunque es poca, podría atribuirse a efectos salinos, ya que el sistema PEG-1000/citrato de sodio contiene más concentración de sal por lo que el efecto “*salting-out*” puede ser mayor en este SAB [5]. Es importante mencionar que la forma quinonoide (rosa) de la PhPh tiene mayor carácter hidrofóbico y esto sugiere que la molécula prefiere estar en entornos más hidrofóbicos como la fase polimérica, por ello, podemos observar en la Figura 3 que la forma quinonoide se concentra en la fase polimérica.

3.2. Degradación y estabilización de PhPh.

En la Figura 3 se muestra cómo la coloración de la PhPh permanece estable en la fase polimérica de los sistemas bifásicos PEG-1000/citrato de sodio y PEG-1000/sulfato de sodio a lo largo del tiempo, mientras que en la disolución acuosa de NaOH 0.05 M muestra una degradación evidente. Para profundizar este comportamiento, se analizaron los espectros UV-Visible y el pH de las muestras.



Figura 3. Evolución de la coloración de la fenolftaleína (PhPh) en A) PEG-1000/citrato de sodio, B) PEG-1000/sulfato de sodio y C) NaOH 0.05 M a lo largo del tiempo.

La [Tabla II](#) resume los valores de pH al inicio y al final del análisis de degradación de la PhPh en distintos medios. Como se muestra, el pH se mantiene prácticamente constante tanto en el medio como en el tiempo de análisis. Estos datos permiten inferir que la degradación y estabilidad de la especie quinonoide está influenciada por el entorno químico.

Tabla II. Valores de pH de la PhPh en NaOH 0.05 M y en fases poliméricas de los SAB, al inicio y al final del análisis de degradación.

Muestra	pH Inicial	pH Final
[PhPh] = 10 ppm en NaOH 0.05 M	12.11	12.27
PhPh en FP (PEG-1000/Citrato de sodio)	12.03	12.02
PhPh en FP (PEG-1000/Sulfato de sodio)	12.05	11.82

Analizando el comportamiento de la degradación de PhPh en disolución acuosa de NaOH 0.05 M ([Figura 3](#), inciso C). El espectro del blanco NaOH 0.05 M confirma que los cambios observados en los espectros de la [Figura 4](#) pertenecen a la molécula de PhPh. Si la PhPh se encuentra en un medio altamente básico (Ver [Tabla II](#)), el exceso de OH⁻ puede provocar la apertura del anillo lactónico y la pérdida de la conjugación. Esto causa la formación de productos que pueden presentar absorción en el rango UV, por ello se puede observar el aumento progresivo en la absorbancia en el rango de 335 nm ([Figura 4](#)). De forma simultánea, para la señal de ~560 nm perteneciente a la especie quinonoide (rosa) se presenta una pérdida de la absorbancia lo cual afecta directamente a la especie coloreada y experimentalmente se observó la pérdida gradual del color en la disolución.

Para corroborar si los cambios observados están ligados a la degradación de la especie quinonoide y no a un desplazamiento ácido-base, se adicionaron gotas de NaOH 0.05 M como prueba cualitativa para evaluar la recuperación de la señal en ~560 nm (color rosado). Con esta adición, se observó la ausencia de la reaparición del color, esto confirmó que, en este sistema NaOH 0.05 M, la fenolftaleína sufre una degradación irreversible.

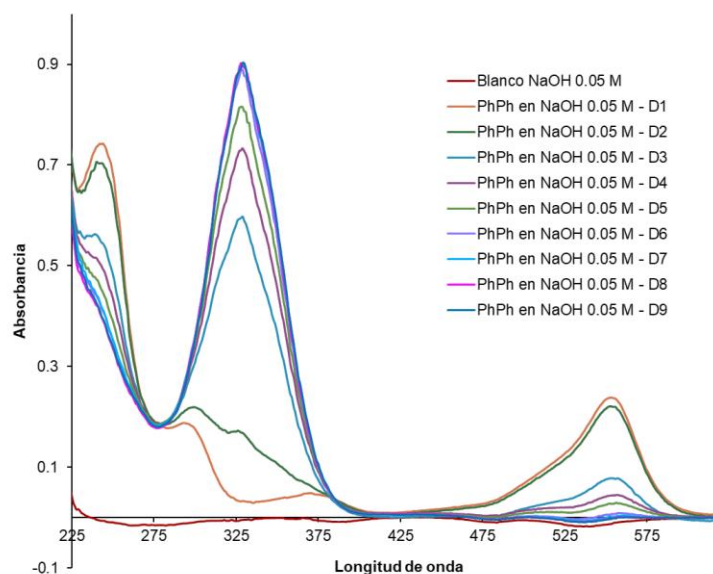


Figura 4. Evolución de los espectros UV-Vis de la fenolftaleína en NaOH 0.05 M indicando la desaparición de la especie quinonoide.

En contraste, al analizar de los espectros de la PhPh en fase polimérica (FP) de los sistemas PEG-1000/Na₃Cit y PEG-1000/Na₂SO₄ (Figuras 5 y 6). la señal aproximada en 555–565 nm casi no decae de D1 a D9, por lo que podría concluirse que la especie quinonoide permanece estable por más tiempo. Las razones químicas más probables son:

- 1) Menor actividad de los hidroxilos en medio polimérico ya que el alto contenido de PEG y sal podrían provocar este fenómeno [6].
- 2) Estabilización de la PhPh causadas por la interacción con el PEG debido a una posible solvatación que impide la ruptura de la forma quinonoide [7].
- 3) La mayor viscosidad de la FP puede provocar una menor difusión de especies reactivas, evitando entonces la degradación [8].

Aunado a este comportamiento, también puede observarse que el cambio de absorbancia en PEG-1000/citrato de sodio es menor (de 0.3060 \rightarrow 0.2665 \pm 0.0082) que en PEG-1000/sulfato de sodio ((de 0.3009 \rightarrow 0.2463 \pm 0.0181), esto puede ser por la capacidad complejante y posible efecto amortiguador del citrato en comparación con sulfato.

Sin embargo, para comprender completamente el mecanismo de estabilización de la forma quinonoide en fase polimérica, se requieren estudios espectroscópicos adicionales.

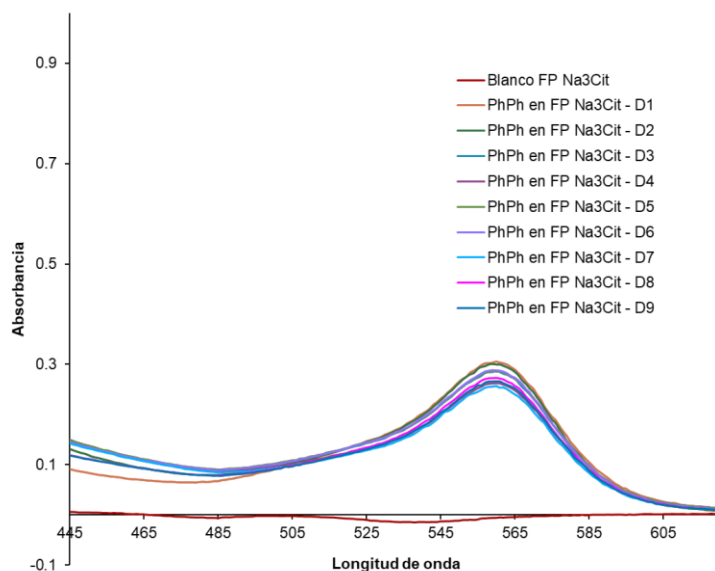


Figura 5. Evolución de los espectros UV-Vis de la PhPh extraída en la fase polimérica (SAB: PEG-1000/citrato de sodio).

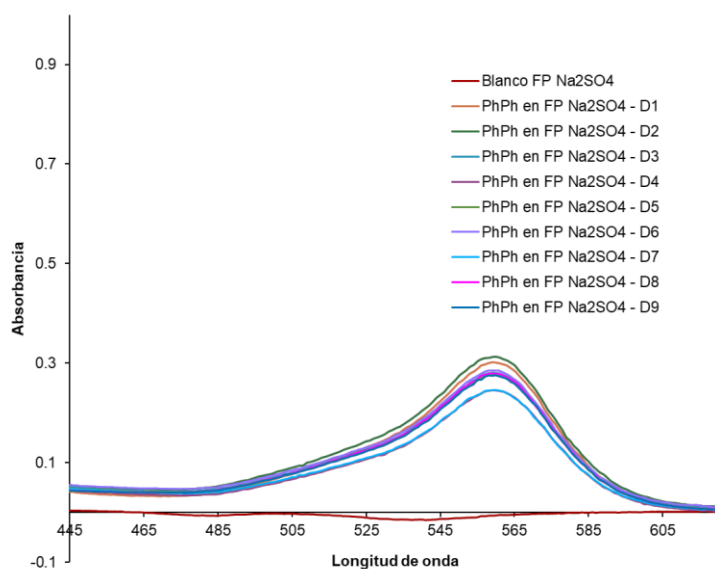


Figura 6. Evolución de los espectros UV-Vis de la PhPh extraída en la fase polimérica (SAB: PEG-1000/sulfato de sodio).

4. CONCLUSIÓN

Con los resultados obtenidos se puede concluir que los SAB no solo extraen la PhPh, sino que también la fase polimérica estabiliza a la molécula durante un largo tiempo. Esto es importante para aplicaciones analíticas o industriales en donde se requieren ambientes suaves y protectores de algunos solutos.

Este estudio abre camino a futuras investigaciones ya que se requieren de análisis adicionales (cinética, espectroscopía avanzada, distribución de PhPh entre fases) para confirmar si la estabilización se debe a la menor actividad de OH^- , interacción específica con PEG, o restricción difusional por viscosidad.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su sincero agradecimiento a la Universidad de Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas (DCNE), así como al Laboratorio Nacional LANCAPFEM-UG-UAA, por el apoyo brindado durante la fase experimental de este trabajo. De igual manera, se reconoce la guía y asesoría proporcionadas por el Cuerpo Académico de Química Analítica Ambiental y de Procesos Industriales de la DCNE, en particular al Dr. Mario Ávila Rodríguez y a la M.C. Diana Esmeralda Martínez Rodríguez.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] V.M. Bhuchar, V.P. Kukreja, S.R. Das, Evaluation of color changes of indicators. Specific color discrimination of phthalein and sulfonephthalein indicators, *Anal. Chem.* 43 (1971) 1307–1312. <https://doi.org/10.1021/ac60307a019>
- [2] B. Fantus, J.M. Dyniewicz, Phenolphthalein studies: Elimination of phenolphthalein, *JAMA.* 110 (1938) 796–799. <https://doi.org/10.1001/jama.1938.02790110022007>

- [3] P.F. Coogan, L. Rosenberg, J.R. Palmer, B.L. Strom, A.G. Zauber, P.D. Stolley, S. Shapiro, Phenolphthalein Laxatives and Risk of Cancer, *J. Natl. Cancer Inst.* 92 (2000) 1943–1944. <https://doi.org/10.1093/jnci/92.23.1943>
- [4] Iqbal, M., Tao, Y., Xie, S., Zhu, Y., Chen, D., Wang, X., Huang, L., Peng, D., Sattar, A., Shabbir, M. A. B., Hussain, H. I., Ahmed, S., & Yuan, Z. (2016). *Aqueous two-phase system (ATPS): an overview and advances in its applications*. *Biological Procedures Online*, 18(1), Article 18. <https://doi.org/10.1186/s12575-016-0048-8>
- [5] Martínez-Rodríguez DE, Martínez-Rodríguez ED, Hernández-Perales L, González-Muñoz MDP, Avila-Rodriguez M. Study of diclofenac distribution in aqueous two-phase PEG/salt/water systems. *RSC Adv.* 2025 Jun 23;15(26):21168-21182. doi: 10.1039/d5ra01070e. PMID: 40551830; PMCID: PMC12183683.
- [6] Kontogeorgis, G. M. (1993). Simple activity coefficient model for the prediction of solvent activities in polymer solutions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 32(7), 1510–1516. <https://doi.org/10.1021/ie00014a013>
- [7] Leininger, N. F., Gainer, J. L., & Kirwan, D. J. (2004). Effect of aqueous PEG or PPG solvents on reaction selectivity and Gibbs energies. *AIChE Journal*, 50(3), 511–522. <https://doi.org/10.1002/aic.10044>
- [8] Pavlović, M., Plucinski, A., Zhang, J., Antonietti, M., Zeininger, L., & Schmidt, B. V. K. J. (2020). Cascade kinetics in an enzyme-loaded aqueous two-phase system. *Langmuir*, 36(6), 1401–1408. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c00186>

EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO DE PLOMO: INFLUENCIA DEL TIPO DE EXTRACTANTE, PH Y EL MODIFICADOR ORGÁNICO



EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO DE PLOMO: INFLUENCIA DEL TIPO DE EXTRACTANTE, PH Y EL MODIFICADOR ORGÁNICO

Isabel Guadalupe Mendoza Reyes¹, Diana Esmeralda Martínez Rodríguez¹, Mario Avila
Rodríguez²

¹División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.

²Departamento de Química. División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato,
Universidad de Guanajuato.

Correo electrónico del autor de contacto: ig.mendozareyes@ugto.mx

RESUMEN

El plomo ha sido un metal clave en la historia de la humanidad, aunque su uso ha disminuido por razones de salud, sigue siendo relevante en sectores industriales como construcción, baterías, electrónica, protección radiológica, armamento y arte. Este trabajo evaluó la eficiencia de extracción de plomo a 10 ppm mediante el uso de dos extractantes orgánicos, Cyanex 272 y D2EHPA, en condiciones de pH ácido, además de analizar el efecto del uso de decanol como modificador de la fase orgánica. La metodología consistió en preparar soluciones acuosas de plomo a 10 ppm, ajustando el pH en un intervalo de 1 a 4. Se realizó extracción líquido-líquido utilizando ambos extractantes disueltos en 10 % v/v Decanol/Queroseno. Luego, se repitió la extracción con D2EHPA disuelto únicamente en queroseno. Los resultados mostraron que el extractante más eficiente fue D2EHPA, con una eficiencia mayor al 99 % a pH 4. Al eliminar el decanol del sistema, la eficiencia de extracción se mantuvo sin cambios significativos. En conclusión, D2EHPA es altamente eficiente para la recuperación de plomo en medios ácidos y puede emplearse sin modificadores como el decanol, lo que representa una ventaja en términos de simplicidad y costos para futuras aplicaciones en distintos sectores.

Palabras clave: Plomo; Extracción líquido-líquido; Extractantes; Cyanex 272; D2EHPA; Modificador orgánico

1. INTRODUCCIÓN

El plomo, con símbolo Pb en la tabla periódica de los elementos químicos, tiene un peso molecular de 207.19 g/mol, sus estados de oxidación más comunes son el +2 y +4. Físicamente tiene una apariencia de metal color gris azulado, es blando, maleable, dúctil y no se considera como un buen conductor eléctrico en comparación con otros metales [1]. Dentro de sus usos más destacados está la fabricación de acumuladores (baterías de plomo-ácido), apantallamiento contra la radiación, soldaduras, pigmentos, blindajes, revestimientos corrosivos, etc. [2].

Este metal tan importante en la vida cotidiana también ha sido foco de atención debido a los daños que puede provocar en los ecosistemas y en la salud de los seres vivos. Como contaminante ambiental se puede acumular en suelos cercanos a zonas industriales provocando la reducción de la fertilidad del suelo y alterando el crecimiento de la flora debido a la afectación que provoca en la absorción de nutrientes esenciales. En cuerpos acuáticos puede disolverse parcialmente y acumularse en sedimentos, esto es tóxico para los organismos acuáticos, aún a bajas concentraciones. Los efectos que tiene el Pb en la fauna implican el daño al sistema nervioso y la reproducción, incluso parálisis y muerte. Este metal no se degrada en el ambiente y su presencia puede durar siglos [3].

El Pb también puede acumularse en los seres humanos principalmente mediante las vías de inhalación e ingestión, provocando efectos adversos en la salud. Este compuesto se bioacumula en tejidos, especialmente en huesos e hígado [4]. La constante exposición a este metal pesado causa patologías peligrosas como la anemia, fatiga, dolor de cabeza, vómito, daño hepático, enfermedades cardíacas y neurológicas, entre otras. Estos síntomas causados por la intoxicación por Pb suelen ser desapercibidos ya que no se presentan inmediatamente, incluso pueden ser confundidos con otras enfermedades que dañan al cuerpo [5] y pueden causar incluso el deceso de los seres humanos incluso aunque la cantidad de exposición sea mínima, esto es debido a su acumulación y difícil degradación en el organismo.

Con este contexto, el Pb representa un compuesto de gran utilidad en diversos ámbitos de la vida cotidiana, pero a su vez también como una de las principales preocupaciones por su impacto en

la contaminación ambiental y su alta toxicidad para la salud de seres vivos. Por ello, resulta de suma importancia continuar desarrollando estudios orientados a su recuperación y remoción.

En este proyecto se propone una alternativa basada en la extracción líquido-líquido convencional (técnica de separación en donde un soluto en fase acuosa se transfiere selectivamente hacia una fase orgánica) empleando extractantes orgánicos comerciales selectivos. Por lo tanto, se evaluaron dos extractantes comerciales: Cyanex® 272 (ácido bis(2,4,4-trimetilpentil)fosfónico) y D2EHPA (ácido di(2-etilhexil)fosfórico). Ambos tienen la capacidad de formar complejos estables con algunos iones metálicos, ayudando así a la transferencia de masa desde la fase acuosa hasta la fase orgánica. Estos extractantes presentan una alta eficiencia de extracción de metales en pH controlados, además de que son de bajo costo, lo que los convierte en una opción viable para su aplicación en procesos de recuperación de metales pesados [6-7].

El objetivo de este estudio es analizar el comportamiento del proceso de extracción líquido-líquido del Pb en medio acuoso, evaluando el efecto de diferentes variables: el tipo de extractante empleado, la incorporación de un modificador en la fase orgánica (decanol) y la variación del pH de la fase acuosa.

2. METODOLOGÍA

2.1. Materiales.

Las disoluciones acuosas se prepararon utilizando agua desionizada (Marca: Karal), con una conductividad de $1.2 \times 10^{-6} / \Omega \cdot \text{cm}$. Los ensayos de extracción líquido-líquido de iones Pb^{2+} utilizaron los extractantes Cyanex® 272 (Marca: Cytec®) y D2EHPA (Marca: Lanxess®), disueltos en una mezcla de decanol (Marca: Aldrich) y queroseno (Marca: Karal) en una proporción 10:90, respectivamente. El plomo (Pb^{2+}) se obtuvo a partir de un estándar de 1000 ppm preparado en una matriz de HNO_3 al 1 % (Marca: Karal). Finalmente, los ácidos y bases utilizados para la preparación de disoluciones y el ajuste de pH fueron ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido clorhídrico (HCl) y NaOH (Marca: Karal).

2.2. Procedimiento Experimental.

2.2.1. Estudio del efecto del pH de la fase acuosa sobre la eficiencia del extractante en la extracción de Pb.

Se llevaron a cabo ensayos de extracción líquido-líquido poniendo en contacto 5 mL de fase acuosa (FA) con 5 mL de fase orgánica (FO) bajo agitación mecánica a velocidad moderada de 200 rpm (Metodología representada en la [Figura 1](#)). La fase acuosa consistió en una solución de Pb de 10 ppm, ajustada a los pH deseados (1, 2, 3 o 4) mediante acidificación con ácido sulfúrico o alcalinización con hidróxido de sodio, ambos a 0.1 M. La fase orgánica estuvo constituida por Cyanex 272 o D2EHPA como extractantes, a una concentración de 0.1 M, disueltos en queroseno como diluyente, con un 10 % (v/v) de decanol como modificador de fase. Todos los experimentos se realizaron por triplicado para asegurar la reproducibilidad de los resultados.

2.2.2. Análisis de la recuperación de Pb con D2EHPA sin modificador de fase.

En un segundo conjunto de experimentos representados en la [Figura 1](#), se empleó una solución acuosa de Pb de 10 ppm ajustada a pH 4, la cual se puso en contacto con 5 mL de fase orgánica compuesta únicamente por D2EHPA como extractante y queroseno como diluyente, omitiendo el uso de modificador de fase (decanol).

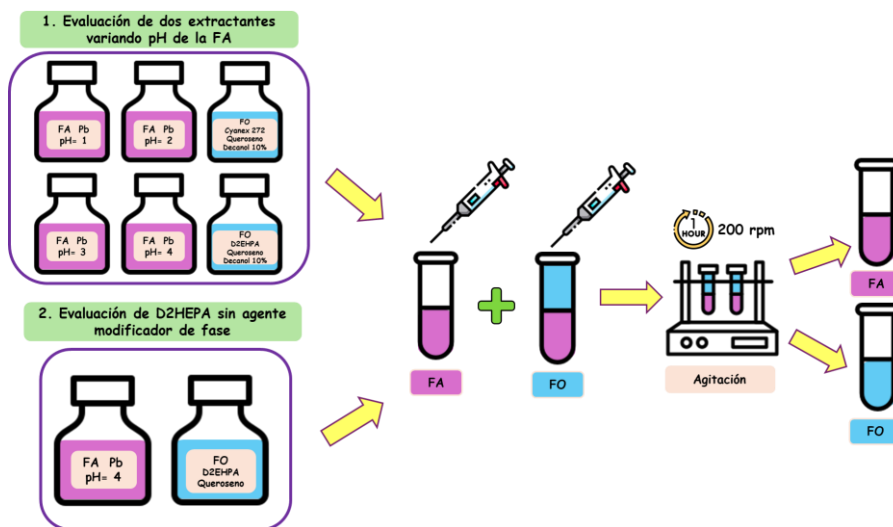
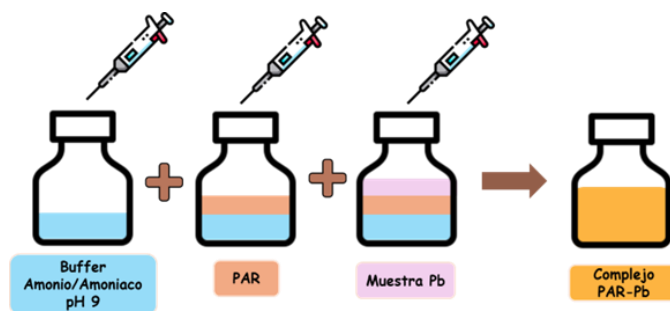


Figura 1. Evaluación del extractante para la recuperación de Pb modificando el pH de la fase acuosa y la presencia del modificador de fase.

2.2.3. Cuantificación de Pb en medio acuoso mediante espectroscopía UV-Vis.

La cuantificación de Pb en medio acuoso se realizó por espectrofotometría UV-Vis, utilizando el reactivo 4-(2-piridilazo)resorcinol (PAR) como agente complejante y un sistema buffer amonio/amoníaco para ajustar el pH a 9. A partir de una solución madre de 1000 ppm de Pb^{2+} , se prepararon soluciones estándar en un rango de 1 a 10 ppm. Para la construcción de la curva de calibración, se colocaron alícuotas de 0.2 mL de cada estándar en matraces aforados de 10 mL, seguidos de 1 mL de una solución de PAR 10^{-3} M. El pH se ajustó a 9 con la solución buffer amonio/amoníaco, y se aforó a volumen final con agua desionizada (ver [Figura 2](#)). Las mezclas se dejaron reaccionar durante 10 minutos a temperatura ambiente antes de medir la absorbancia del complejo Pb-PAR a 520 nm en un espectrofotómetro UV-Vis (Marca: Varian, Modelo: Cary 50 Probe) utilizando una celda de cuarzo de camino óptico de 1 cm. Las muestras problema (fases acuosas) se trataron bajo las mismas condiciones. La concentración de Pb en las muestras se determinó por interpolación de su absorbancia en la curva de calibración. Todas las mediciones incluyeron un blanco PAR-buffer.



[Figura 2.](#) Metodología para la cuantificación de Pb mediante espectroscopía UV-Vis aplicando la formación del complejo PAR-Pb.

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

3.1. Cuantificación de Pb en medio acuoso mediante espectroscopía UV-Vis.

Al momento de la realización de la curva de calibración compuesta del complejo PAR-Pb se logró observar variaciones colorimétricas visibles conforme se aumenta la concentración de Pb esto se muestra en la [Figura 3](#). Por otro lado, los resultados mediante espectroscopia UV-Vis se presentan en la [Figura 4](#). En esta figura se observa que la absorbancia en la señal del complejo PAR-Pb

aumenta en función de la concentración de Pb (de 2 a 10 ppm), esto indica que el complejo PAR-Pb se forma efectivamente y la señal es proporcional a la concentración, como se esperaría en una curva de calibración. Mientras tanto, la señal del blanco PAR-Buffer en 410 nm disminuye cuando el PAR interactúa con el Pb, esto es debido a que una fracción de este ligante forma el complejo con el Pb.

En resumen, la imagen muestra que el método con PAR es efectivo para la detección de Pb, un rango lineal útil ($R^2 > 0.990$) para concentraciones de 2 a 10 ppm, con absorbancia máxima alrededor de 520 nm para el complejo PAR-Pb.



Figura 3. Curva de calibración de complejo PAR-Pb.

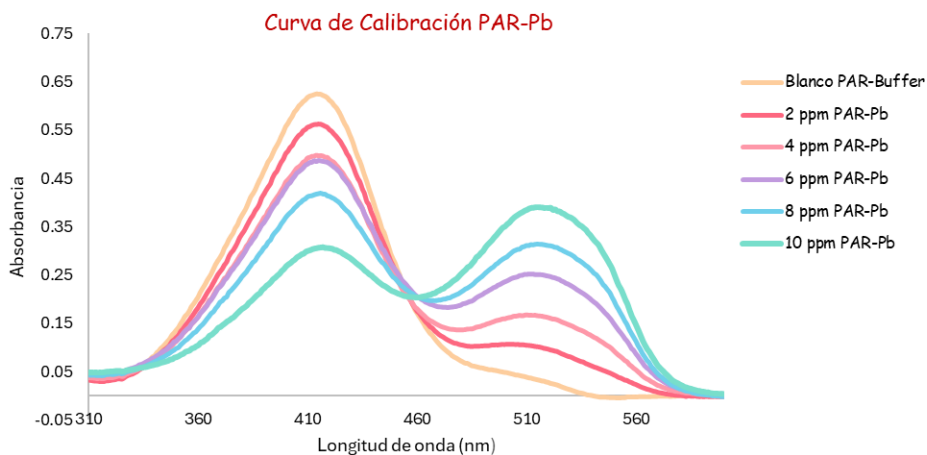


Figura 4. Espectros UV-Vis de la curva de calibración del complejo PAR-Pb.

3.2. Estudio de la eficiencia del tipo extractante en la recuperación de Pb y la modificación del pH acuoso.

Los datos presentados en la [Figura 5](#) evidencian claramente cómo el tipo de extractante (Cyanex 272 y D2EHPA) y el pH afectan la eficiencia de extracción de Pb. En el caso de Cyanex 272, la extracción se mantiene relativamente baja y constante en todo el rango de pH evaluado (30–35 % de extracción de Pb), esto sugiere una afinidad limitada de este extractante por el Pb en condiciones ácidas (pH 1 – 4). Asimismo, indica que el mecanismo de extracción de Cyanex 272 no se favorece a pH bajos para este metal.

Caso contrario, con el extractante D2EHPA se muestra un aumento definido en la eficiencia de extracción conforme incrementa el pH: alrededor de 35 % a pH 1–2, 90 % a pH 3 y 98–100 % a pH 4. Este comportamiento es característico de extractantes ácidos como D2EHPA, que trabajan mediante un mecanismo de intercambio catiónico en donde un pH más alto favorece el desplazamiento del equilibrio hacia la extracción de Pb^{2+} .

En general, en esta etapa el D2EHPA resulta considerablemente más eficaz que Cyanex 272 para la extracción de Pb, especialmente a pH superiores a 2. Cabe mencionar que en esta etapa se empleó decanol como agente modificador de fase para prevenir la formación de emulsiones y evaluar correctamente la eficiencia de cada extractante; en los resultados siguientes, la presencia de decanol se omite para evaluar que este compuesto orgánico no es un factor que favorezca la extracción de Pb.

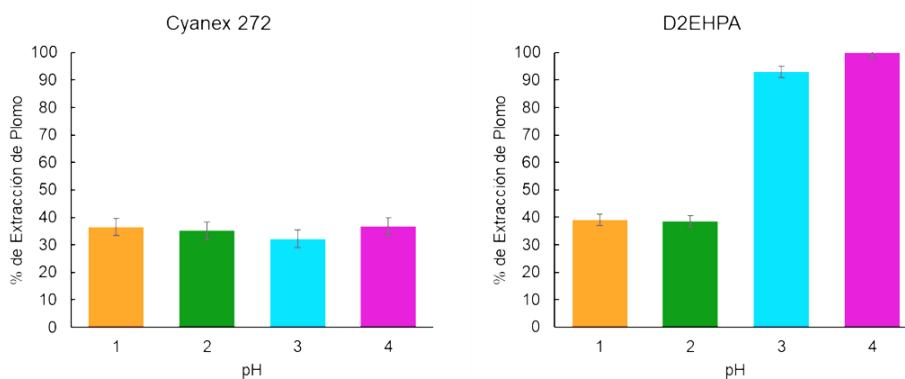
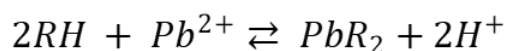


Figura 5. Porcentaje de extracción de Pb en función de los extractantes Cyanex 272 y D2EHPA disueltos en decanol: queroseno (10:90) y en función del pH.

3.3. Evaluación de la extracción de Pb mediante D2EHPA sin adición de modificador de fase.

A partir de los resultados previos, se continuó el estudio de la extracción de Pb en la fase acuosa a pH 4, empleando D2EHPA disuelto en queroseno y sin la adición del agente modificador de fase (decanol). Los datos obtenidos en esta sección experimental indicaron que la extracción de Pb sigue siendo altamente eficiente (> 99 %). Este comportamiento se explica en la [Figura 6](#) ya que la naturaleza ácida de D2EHPA (RH), el cual trabaja mediante un mecanismo de intercambio iónico, en presencia de un exceso de protones (H⁺) inhibe la reacción hacia la formación del complejo, mientras que al aumentar el pH (es decir, disminuir H⁺) se favorece la generación de PbR₂ en la fase orgánica [8].

Además, D2EHPA es un extractante altamente hidrofóbico y soluble en disolventes orgánicos como el queroseno. Esta propiedad permite la formación de una fase orgánica estable sin requerir un agente modificador de fase, como el decanol, que normalmente se emplea para prevenir la formación de emulsiones y mejorar la miscibilidad entre fases.



[Figura 6.](#) Reacción de intercambio iónico de DE2HPA para la extracción de Pb²⁺.

4. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar la eficiencia de la extracción líquido-líquido de Pb utilizando los extractantes comerciales Cyanex 272 y D2EHPA, bajo diferentes condiciones de pH y con la presencia o ausencia de decanol como modificador de fase orgánica. A partir de los resultados obtenidos, se concluyó que el extractante D2EHPA mostró una eficiencia de extracción significativamente superior a la del Cyanex 272 en el rango de pH evaluado (1 a 4), alcanzando una eficiencia mayor al 99 % a pH 4. El pH de la fase acuosa es un factor crítico en la eficiencia de extracción con D2EHPA, observándose un aumento en la recuperación de Pb al incrementar el pH de 1 a 4, debido al mecanismo de intercambio iónico característico de este tipo de extractantes ácidos. La presencia de decanol como modificador orgánico no influyó de manera significativa en la eficiencia de extracción, esto sugiere que D2EHPA puede emplearse sin agentes modificadores, simplificando el proceso y reduciendo costos.

Por lo tanto, D2EHPA es un extractante altamente eficiente para la recuperación de Pb, lo que lo posiciona como una opción técnica y económicamente favorable para su aplicación en procesos de remediación o recuperación de metales pesados en diversos contextos industriales y ambientales.

5. AGRADECIMIENTOS

La autora principal desea expresar su agradecimiento a la Universidad de Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas (DCNE), así como al Laboratorio Nacional LANCAPFEM-UG-UAA por el apoyo brindado durante el desarrollo experimental de este trabajo. Asimismo, se reconoce la valiosa orientación y asesoría del Cuerpo Académico de Química Analítica Ambiental y de Procesos Industriales de la DCNE, en particular del Dr. Mario Avila Rodriguez y de la M.C. Diana Esmeralda Martínez Rodríguez, cuyo conocimiento y acompañamiento fueron fundamentales para la realización de este estudio.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Los Alamos National Laboratory. (2021). *Lead*. En *Periodic Table of Elements*. Recuperado de <https://periodic.lanl.gov/82.shtml>
- [2] The Editors of Encyclopedia Britannica. (2025, 28 de agosto). *Lead | Definition, Uses, Properties, & Facts*. En *Encyclopedia Britannica*. Recuperado de <https://www.britannica.com/science/lead-chemical-element>
- [3] Flora, G., Gupta, D., & Tiwari, A. (2012). Toxicity of lead: A review with recent updates. *Interdisciplinary Toxicology*, 5(2), 47–58. <https://doi.org/10.2478/v10102-012-0009-2>
- [4] Muñoz, H. / Taborda, I. (2012, 24 de octubre). *Plomo*. En *Riesgos Ambientales*. Recuperado de https://riesgosambientalespm.blogspot.com/2012/10/plomo_7259.html
- [5] De Salud, H. (s. f.). ¿Qué daños a la salud causa el plomo? gov.mx. <https://www.gob.mx/promosalud/es/articulos/que-danos-a-la-salud-causa-el-plomo?idiom=es>

[6] Nguyen, V. N. H., Nguyen, T. H., & Lee, M. S. (2020). Revisión sobre la comparación de la reactividad química de Cyanex 272, Cyanex 301 y Cyanex 302 para su aplicación en la separación de metales a partir de medios ácidos. *Metales*, 10(8), 1105. <https://doi.org/10.3390/met10081105>

[7] Grymonprez, B. (2024). Solubility of di-(2-ethylhexyl)phosphoric acid (D2EHPA) in aqueous solutions: Effect of pH, extractant concentration, and anion type. *Journal of Hazardous Materials*, 456, 131859. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131859>

[8] Pérez-Garibay R, Martínez-Jiménez J, Uribe-Salas A, Martínez-Luévanos A. Comparative study between D2EHPA and Cyanex 272 as extractants of Mn(II) from a leached liquor produced by reductive leaching of a pyrolusite ore with SO₂. *Engineering*, 04(09), 526–531. <https://doi.org/10.4236/eng.2012.49067>

DISEÑO DE SISTEMA ELECTRÓNICO REGULADOR Y OPTIMIZADOR DE CONSUMO DE AGUA PARA EL RIEGO DE CULTIVOS Y PLANTAS



DISEÑO DE SISTEMA ELECTRÓNICO REGULADOR Y OPTIMIZADOR DE CONSUMO DE AGUA PARA EL RIEGO DE CULTIVOS Y PLANTAS

Luis Enrique Cerda Lagunas ¹, Abril Angélique De Santiago Bravo ², Alex Diego Ocegüera Pérez ³, José de Jesús Mendoza Osorio ⁴

¹Universidad Politécnica de Pénjamo, ²Universidad Politécnica de Pénjamo, ³Universidad Politécnica de Pénjamo, ⁴Universidad Politécnica de Pénjamo

Correo electrónico del autor de contacto: 24021500018@uppenjamo.edu.mx

RESUMEN

El proyecto HydraOptimus aborda la problemática de la falta de tecnificación del campo para el riego de cultivos de pequeños productores, en el municipio de Pénjamo, Guanajuato. Surge con la finalidad de hacer un uso óptimo del agua para el riego y con ello controlar la cantidad de líquido a suministrar con base en tipo de siembra, humedad del suelo, entre otros. Pues si estos factores no se controlan, los agricultores se ven afectados dado que un exceso de agua o deficiencia de esta puede echar a perder los cultivos resultando en pérdidas económicas.

A su vez, la automatización del riego suele ser cara y no es posible para los pequeños productores pagarla, teniendo que realizar estas acciones de manera manual o depender del clima.

HydraOptimus impacta en 6 ODS de la agenda 2030: 9, 11, 12, 13, 15 y 17.

Palabras clave: Optimizador; Automatización; Tecnificación; PH; Sensor; Humedad.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es el recurso natural más esencial para la vida, pero su disponibilidad para el consumo humano es limitada: solo el 2.5% del total en el planeta es agua dulce. En el estado de Guanajuato, y particularmente en el municipio de Pénjamo, esta escasez se agrava por condiciones climáticas de sequía que afectan gravemente al sector agrícola, principal consumidor del recurso hídrico con un uso estimado entre el 76% y el 87% del total disponible. A pesar de esta alta demanda, se estima que hasta un 60% del agua destinada al riego se desperdicia, lo que evidencia una falta de tecnologías eficientes y accesibles para los productores, especialmente los de pequeña escala.

La ausencia de sistemas de riego adecuados no solo reduce la productividad agrícola, sino que también pone en riesgo la salud de los trabajadores del campo y compromete la calidad de los alimentos, afectando la seguridad alimentaria. Además, los sistemas modernos como el riego por goteo o aspersión suelen implicar costos elevados, lo que limita su adopción por parte de pequeños productores, quienes continúan utilizando métodos tradicionales de baja eficiencia.

Ante esta problemática, se propone el diseño de un sistema de riego por goteo de bajo costo, apoyado en electrónica de potencia y energías renovables, que permita la tecnificación del campo y mejore el aprovechamiento del agua. Este sistema integrará sensores distribuidos estratégicamente en el terreno para medir la humedad del suelo y otros parámetros relevantes como nutrientes, tipo de suelo y PH. La información obtenida facilitará la toma de decisiones agronómicas y permitirá graficar el consumo hídrico por zonas, optimizando el riego y promoviendo un uso más racional del recurso.

La propuesta busca ser adaptable a distintos tipos de cultivo y escalas de producción, beneficiando tanto a grandes como pequeños productores, y posicionándose como una solución integral, sostenible y accesible frente a la crisis hídrica que enfrenta el estado.

METODOLOGÍA

A continuación, se describen las acciones realizadas en cada una de las etapas basadas en los objetivos específicos:

1. Determinar el área de trabajo

Se realizó un recorrido por las instalaciones de la Universidad Politécnica de Pénjamo (UPPE), para localizar un espacio adecuado para el desarrollo del sistema, tal y como se observa en la [Figura 1](#).



Figura 1. Imagen aérea de la UPPE

2. Elaborar el plano del terreno.

Con base en el espacio autorizado, se elaboró un plano que contempló las dimensiones del terreno y la orientación para su uso como área de trabajo y distribución del sistema. El terreno tiene un total de 40 m². Con una longitud de 10m x 4m de ancho. En la figura 2 se muestra el plano del terreno.

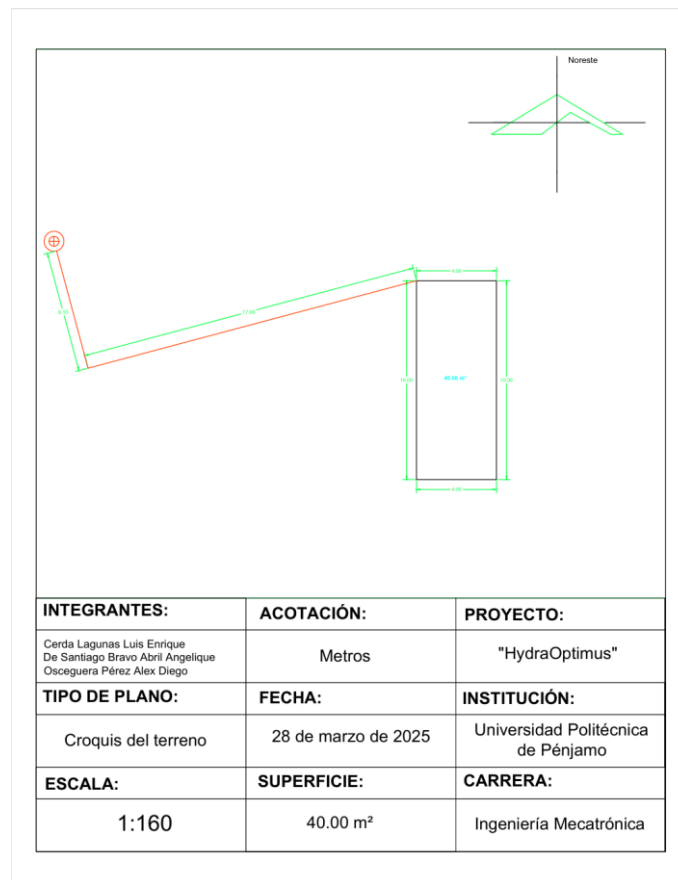


Figura 2. Plano del terreno

3. Limpiar el área designada.

Posteriormente, se procedió con la limpieza del terreno. Como se muestra en la [figura 3](#) Se retiró maleza, basura y escombros con el apoyo de herramientas manuales y estudiantes de ingeniería mecatrónica, se dejó el área lista para la siguiente fase del proyecto. En la [figura 4](#) se muestran los rostros del equipo de trabajo.



[Figura 3.](#) Limpieza del terreno con alumnos de la carrera de ingeniería en mecatrónica.



[Figura 4.](#) Grupo de limpieza de terreno una vez terminada la labor.

4. Realizar plano con las camas.

En el programa AutoCAD se realizó un plano con las camas para cada hortaliza y la distribución de los sensores considerando un sensor de humedad resistivo, tal como se aprecia en la [Figura 5](#).

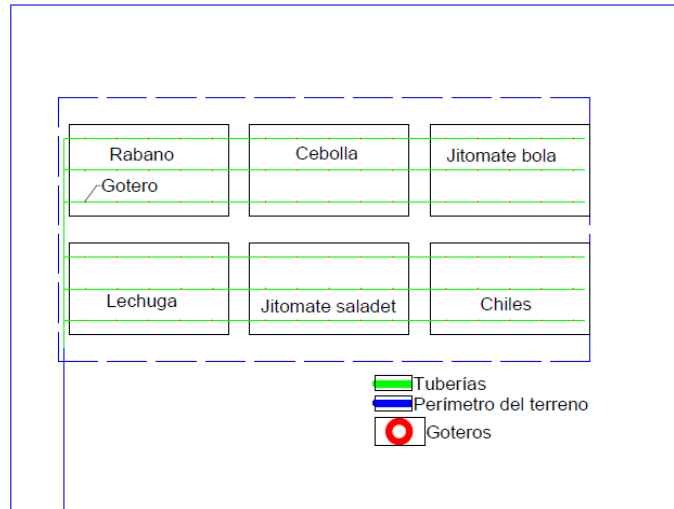


Figura 5. Plano de distribución de hortalizas y sensores de humedad por camas.

5. Seleccionar y preparar componentes.

Se realizó una búsqueda de componentes para la creación del sistema de riego considerando el espacio de las camas del huerto y el espacio total, al igual que se comenzó con algunas conexiones y soldaduras basadas en un sistema de riego como se aprecia en la Figura 6.

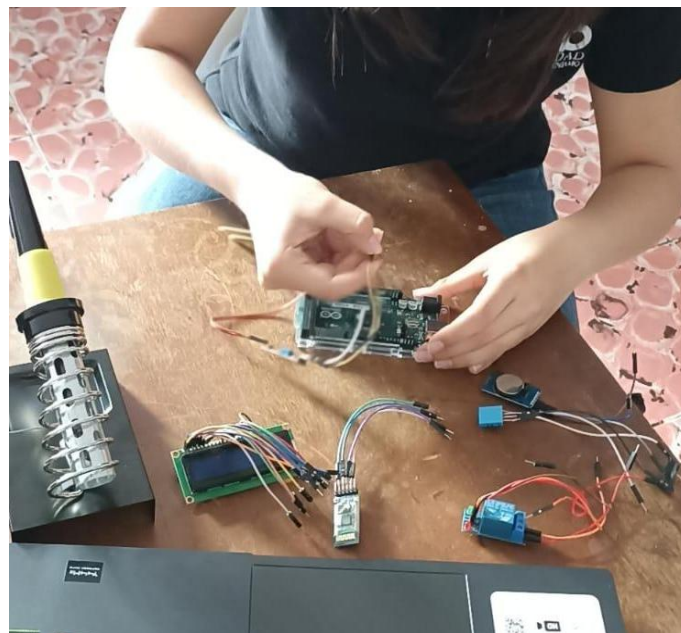


Figura 6. Conexiones y soldadura

6. Recolección de semillas.

Se seleccionaron árboles de tabachín y guaje de la UPPE para la recolección de semillas, se extrajeron de sus vainas, se contabilizaron y almacenaron en frascos para la conservación de las semillas no utilizadas involucrando a 10 estudiantes de ingeniería automotriz quienes se observan en la [Figura 7](#).



[Figura 7](#). Recolección de semillas con alumnos de algunas carreras de la UPPE

7. Germinar las semillas recolectadas en semilleros.

Se consiguieron semilleros los cuales fueron rellenos de tierra fina, posterior a eso se introdujo la semilla y se realizó el primer riego, tal como se muestra en las [Figuras 8 y 9](#).



[Figura 8](#). Plantación de tabachín para su germinación con compañía de un experto.



Figura 9. Colocación de semilla guaje en semilleros para su germinación.

8. Trasplante de plántulas a bolsas.

En la Figura 10 se aprecia que, transcurridos 2 meses de la germinación, las plántulas crecieron un aproximado de 6 a 10 cm, lo suficiente para ser trasplantadas a un recipiente más grande como se muestra en la Figura 11.



Figura 10. Trasplante de las plantas del semillero a bolsas.



Figura 11. Preparación de la tierra y trasplante de plántulas.

ANÁLISIS Y RESULTADOS

Durante el desarrollo del proyecto se evaluaron los espacios disponibles en la Universidad Politécnica de Pénjamo, seleccionando un área óptima para la implementación y pruebas del sistema de riego por goteo, se realizó el diagrama del terreno a limpiar a través del programa AutoCAD, delimitando claramente los espacios destinados a la plantación y la futura instalación del prototipo de riego. Una vez definida el área, se realizó la limpieza de la misma.

Como parte de las actividades complementarias, se impartieron talleres y pláticas de educación ambiental dirigidos a 25 niños de la escuela primaria *Venustiano Carranza*, fomentando el conocimiento sobre plantas, su cuidado y la importancia de la conservación ambiental. Asimismo, 35 estudiantes de distintas carreras de la Universidad Politécnica de Pénjamo participaron en actividades prácticas sobre la germinación de semillas y el desarrollo de las plantas, fortaleciendo su comprensión de los procesos biológicos y del manejo sostenible de la flora.

Se recolectaron semillas de cuatro especies de árboles locales: tabachín, jacaranda, guaje y colorín, lo que permitió adquirir un amplio conocimiento sobre las características de cada especie y sus requerimientos de crecimiento. Estas semillas fueron sembradas en tres semilleros diferentes, alcanzando un total aproximado de 350 semillas. Durante el periodo de seguimiento germinaron 100 plántulas, distribuidas entre las especies seleccionadas, de las cuales 27 alcanzaron el tamaño entre 6 y 10 cm, suficiente para ser trasplantadas a bolsas individuales, logrando un desarrollo inicial exitoso en la fase de crecimiento. Las especies trasplantadas incluyen 7 tabachines, 9 colorines y 11 jacarandas que continúan en crecimiento para su posterior trasplante definitivo.

CONCLUSIONES

El desarrollo del sistema de riego por goteo automatizado ha representado una experiencia significativa tanto en el ámbito técnico como en el educativo. Uno de los principales logros del proyecto ha sido el impacto positivo en la formación ambiental de los estudiantes involucrados, quienes han adquirido mayor conciencia sobre el uso responsable del agua y la importancia de aplicar soluciones sustentables en el sector agrícola.

A pesar de los avances obtenidos, la continuidad del prototipo se ha visto limitada por la falta de recursos económicos, lo que ha dificultado la adquisición de materiales clave para su implementación completa. Sin embargo, el proceso de experimentación ha permitido identificar mejoras importantes en el diseño, como el reemplazo de sensores de humedad resistivos por sensores capacitivos, los cuales ofrecen mayor precisión, durabilidad y alcance.

HydraOptimus continúa evolucionando como una propuesta accesible, eficiente y con alto potencial para transformar las prácticas de riego en beneficio de los pequeños productores agrícolas.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a la Universidad Politécnica de Pénjamo por el apoyo brindado para el desarrollo del proyecto HydraOptimus, proporcionando el espacio y el acompañamiento necesario para su realización. Así mismo, agradezco a los profesores y asesores por el apoyo y tiempo dedicado al proyecto.

Extiendo un especial agradecimiento al Centro de Investigaciones en Óptica (CIO), por su disposición y apoyo en la difusión académica de este trabajo, así como por la oportunidad de colaborar en la publicación del artículo de investigación relacionado con este proyecto.

De igual manera, reconozco la participación de los estudiantes y colaboradores que apoyaron en las distintas etapas del proyecto, así como a los niños y maestros de la escuela primaria Venustiano Carranza, quienes enriquecieron la dimensión social y educativa de esta iniciativa.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Institución Guanajuato Puerto Interior, S.A. de C.V. (2020). *DIAGNÓSTICO PARTICULAR PROGRAMA PRESUPUESTARIO CAMPO SUSTENTABLE EN EL USO DEL AGUA*. Guanajuato, Guanajuato, México: Institución Guanajuato Puerto Interior, S.A. de C.V. (GPI). Obtenido de <https://iplaneg.guanajuato.gob.mx/wp-content/uploads/2020/12/Informe-Diagn%C3%B3stico-Particular-PP-S011-Campo-Sustentable-Uso-del-Agua-SDAyR.pdf>

[2] Mario René Rivas Domínguez, S. A. (2021). *SISTEMA DE RIEGO INTELIGENTE CON SENSORES Y MONITOREO AUTOMATIZADO DE CULTIVO*. Santiago, Chile: ResearchGate. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/358706558_Sistema_de_riego_automatizado_con_sensores_y_Arduino

[3] LIDER. (22 de Mayo de 2025). Sequía en Guanajuato . (M. h. Figueroa, Ed.) *Sequía en Guanajuato: como afecta al campo y como salvar el sector agrícola*. Obtenido de <https://www.liderempresarial.com/sequia-en-guanajuato-y-acciones-para-mejorar-el-campo/#:~:text=la%20crisis%20h%C3%ADdrica-.Sequ%C3%ADa%20en%20Guanajuato:%20c%C3%B3mo%20afecta%20al%20campo.c%C3%B3mo%20salvar%20el%20sector%20agr%C3%ADcola&text=La%20sequ%C3>

**SISTEMA DE PANELES DIDÁCTICOS PARA LA
ENSEÑANZA DE CONTROL INDUSTRIAL EN
INSTITUCIONES DE NIVEL MEDIA SUPERIOR Y
SUPERIOR**



SISTEMA DE PANELES DIDÁCTICOS PARA LA ENSEÑANZA DE CONTROL INDUSTRIAL EN INSTITUCIONES DE NIVEL MEDIA SUPERIOR Y SUPERIOR

Alexis Yovany Robledo Zavala¹, José de Jesús Mendoza Osorio²

Universidad Politécnica de Pénjamo¹, Universidad Politécnica de Pénjamo²

arobledo@uppenjamo.edu.mx

RESUMEN.

La enseñanza del control industrial a través de dispositivos electromecánicos como relevadores, contactores, temporizadores, etc., En combinación con el Internet Industrial de las Cosas (IIoT) es de gran importancia para los estudiantes de nivel media superior y superior, que cursan las carreras de ingeniería mecatrónica, electromecánica, industrial o afines en instituciones públicas de México, pero desafortunadamente se ve afectada por la cantidad, costos y disponibilidad de los materiales necesarios, el número de estudiantes por grupo y el tiempo disponible para prácticas. Por ello, en este proyecto se propone el diseño y construcción de paneles didácticos para la enseñanza de al menos 25 prácticas sobre control y monitoreo de motores, luminarias o equipos industriales de manera local y remota, facilitando la enseñanza alineada con las exigencias de la Industria 4.0 y un mundo cada vez más globalizado. A su vez, la propuesta reducirá hasta un 75% el tiempo de conexión por práctica representando un mayor número de estudiantes capacitados, es 45% más barata que los sistemas actuales en el mercado y genera impacto en cuatro Objetivos de Desarrollo Sostenible (4, 8, 9 y 10) de la Agenda 2030 [11], reduciendo con esto la brecha tecnológica y contribuyendo a una mejor enseñanza.

Palabras clave: 1. Control industrial, 2. Paneles didácticos, 3. Industria 4.0, 4. Internet Industrial de las Cosas), 5. ODS Agenda 2030

1. INTRODUCCIÓN.

En el contexto actual de la Industria 4.0, la formación en automatización y control industrial requiere de espacios prácticos que permitan a los estudiantes desarrollar habilidades técnicas en entornos similares a los que enfrentarán en el campo laboral [1]. Sin embargo, muchas instituciones educativas, especialmente en regiones con recursos limitados, carecen de laboratorios equipados con tecnología industrial moderna, lo que dificulta la adquisición de competencias prácticas esenciales [2].

Actualmente, los laboratorios de automatización en instituciones públicas suelen depender de equipos obsoletos o de alto costo, lo que dificulta su mantenimiento y actualización [5]. Además, los pocos recursos disponibles suelen ser compartidos entre un gran número de estudiantes, reduciendo el tiempo de práctica individual y aumentando los riesgos operativos debido a la falta de supervisión cercana [6]. Como consecuencia, los alumnos se gradúan con un conocimiento teórico sólido, pero con poca experiencia en el manejo de sistemas industriales reales, afectando su competitividad en el mercado laboral [7].

La Universidad Politécnica de Pénjamo no es ajena a esta problemática. Enfrenta un desafío crítico: la falta de equipos didácticos especializados que permitan a los estudiantes de ingeniería mecatrónica, automotriz, industrial y otras carreras afines a interactuar con sistemas electromecánicos, automatización basada en controles clásicos, controles con PLCs y tecnologías IIoT en un entorno seguro y controlado [3]. Esta limitación no solo restringe el aprendizaje práctico, sino que también amplía la brecha entre la formación académica y las demandas reales del sector industrial [4].

Ante esta situación, surge la necesidad de implementar soluciones innovadoras que permitan simular procesos industriales de manera accesible, segura y eficiente [8]. Una alternativa viable es el desarrollo de paneles didácticos modulares, fabricados con materiales de bajo costo, pero con funcionalidades equivalentes a las de equipos industriales [9]. Estos sistemas no solo facilitarían el aprendizaje práctico, sino que también optimizarían los tiempos de montaje y configuración, permitiendo que más estudiantes puedan utilizarlos de manera simultánea y segura [10].

Este proyecto tiene como objetivo, contribuir a cerrar esa brecha formativa mediante el diseño de un laboratorio de automatización industrial adaptado a las necesidades de la universidad, este primer kit de paneles tiene el nombre de "ProPanel Start". Su implementación no solo mejoraría la calidad educativa, sino que también sentaría un precedente para futuras iniciativas que promuevan la innovación tecnológica en instituciones con recursos limitados.

METODOLOGÍA.

1. Revisión bibliográfica y de mercado: Con el fin de justificar el diseño y acotar alcances, se trabajaron los siguientes puntos:

Fuentes: bases científicas (IEEE), planes de estudio nacionales, catálogos de fabricantes y proveedores nacionales.

Ejes de búsqueda: enseñanza de control industrial, IIoT, Industria 4.0, didáctica con PLC/embebidos, aprendizaje basado en proyectos.

Análisis competitivo: fichas comparativas (precio, módulos, seguridad, manuales, conectividad) de paneles comerciales.

Criterios de éxito: al menos 5 fuentes académicas clave, 5 productos comerciales comparados, lista priorizada de requisitos.

2. Diseño conceptual del sistema: Con el propósito de definir la arquitectura didáctica y técnica, se trabajaron los siguientes puntos considerando únicamente para la primera etapa, el análisis de 10 prácticas:

Se establece el diseño a partir de los controles más comunes como son cableado básico, arranque/parada, inversión de giro, temporización, enclavamientos, paro de emergencia, detección por sensores, usos de dashboard, monitoreo remoto, alarmas, registro de datos, envío de notificaciones por vía telegram con uso de bots.

Componentes: Con base a las 10 prácticas propuestas, se establece usar relevadores, contactores, interruptores magnetotérmicos, interruptores diferenciales, pulsadores, temporizadores, distribuidores, pilotos, fuentes de alimentación, PLC y embebidos (ESP32) con Wi-Fi.

Arquitectura de comunicaciones: Se define un estándar de comunicación inalámbrica y remota, como lo es el Wi-Fi siendo la marca comercial que identifica a los dispositivos que cumplen con la familia de estándares IEEE 802.11, estos suelen usar la familia de protocolos TCP/IP, que es la base de Internet por telemetría y telecontrol hacia un dashboard local en un dispositivo que cuente con la misma u otra red diferente.

Seguridad y normativa: Inicialmente se verifica la funcionalidad de las prácticas en el software CADE SIMU para validar las conexiones seguras y correctas, etiquetado de simbología en acrílico, uso de conectores adecuados del tipo banana hembra y macho, uso de bajas tensiones para prácticas, referencia a normas IEC/NOM en simbología, uso de Poka-yokes y bloqueo hacia la manipulación interna de los paneles por medio de tornillos Allen.

Diseño didáctico y montable: se pensó en un diseño que fuera modular, pequeño, portable y compacto el cual cuenta con las siguientes medidas, ancho de 20 cm por 7 cm de alto que se deben respetar para poder colocarse en las bases de montaje, excepto el largo, ese se diseña según el acomodo de los conectores y del dispositivo o dispositivos, donde este tiene una forma especial para colocarse sobre rieles soldados en una base para su ubicación según la necesidad

de la práctica, escalado por niveles, manuales de prácticas que contienen objetivos estipulados, tiempo estimado, rúbrica de evaluación, diagramas eléctricos, diagramas de conexiones, preguntas de reflexión y el desarrollo de la práctica paso a paso con fotos ilustrativas que relacionan los diagramas con fotos de los paneles ya utilizándolos.

Bases para montaje (1.22 m x 0.85 m): se diseñaron bases de herriería de doble cara como se muestra en la [figura 1](#), que se conforma de 3 niveles o rieles por cara para el montaje correcto, cómodo y organizado de todos y cada uno de los paneles fabricados, tienen la capacidad de compactarse logrando ahorro de espacio y mejora la visibilidad de los puntos de conexión y dispositivos, este diseño tiene como fin que dos grupos de 4 estudiantes cada uno pueda practicar en un mismo espacio pero de lados diferentes, incluso tienen la capacidad de ser portables y desmontables para trabajar de un solo lado apoyándolos en alguna pared o superficie similar.



Figura 1. Bases para montaje de paneles.

3. Para la elaboración de las bases y los paneles robustos, seguros y reproducibles se consideraron los siguientes pasos.

Paso 1: Diseño CAD.

Se elaboró el diseño de cada panel en Autodesk Inventor, definiendo las dimensiones, distribución de dispositivos y ubicación de los conectores. Se generaron planos de fabricación con tolerancias precisas para el corte láser en acrílico y el montaje de componentes.

Paso 2: Preparación de archivos para corte.

Los planos fueron exportados al software RDWorks, encargado de convertirlos en trayectorias para la cortadora láser. Se configuraron parámetros como potencia, velocidad y frecuencia de corte para el grosor de acrílico de 3 mm.

Paso 3: Fabricación de los paneles.

Se utilizó una cortadora láser CO₂ modelo L1390 para realizar los cortes láser de las piezas. En el mismo proceso, se grabó: Simbología eléctrica conforme a la norma IEC, para estandarizar las prácticas también el logotipo de la institución y el número de panel, lo que permite identificar y controlar cada equipo

Paso 4: Instalación de conectores.

Se montaron **conectores tipo banana hembra** en los orificios previamente cortados.

Se realizó el **cableado interno** desde los conectores hacia los dispositivos electromecánicos (relevadores, contactores, pulsadores, pilotos, etc.), garantizando un ensamble ordenado y seguro.

Paso 5: Pruebas de continuidad y corrección de fallas eléctricas.

Se efectuaron mediciones de **continuidad eléctrica** en cada conector, asegurando la correcta transmisión de señales y alimentación. Esta verificación permitió detectar y corregir posibles fallos en el cableado antes de cerrar el panel.

Paso 6: Ensamblaje final y seguridad.

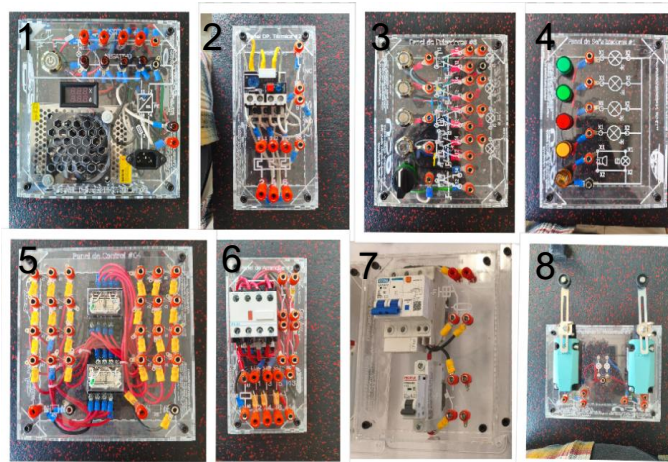
Cada panel se cerró con una tapa de acrílico fijada con cuatro tornillos Allen, lo que asegura rigidez estructural y protección contra manipulaciones indebidas. El diseño sellado permite brindar mejor seguridad al uso repetitivo de estos en laboratorios o talleres sin comprometer la seguridad de estudiantes y docentes.

Paso 7: Fabricación de bases cómodas y productivas.

Se construyeron bases con tres niveles de altura, diseñadas para alojar los paneles de forma segura. Cada lado de la base incorpora tres rieles, que permiten montar los paneles con precisión y estabilidad. El diseño modular y ergonómico facilita la operación por parte de los estudiantes, mejora la organización del laboratorio y optimiza el aprovechamiento del espacio disponible.

Prototipos y productos realizados:

En la [figura 2](#) se observa el kit “ProPanel Start” conformado por 8 paneles, que permite la realización de 10 prácticas:



[Figura 2.](#) Productos realizados que conforman un 1 kit de controles clásicos industriales.

[La tabla 1](#) muestra la descripción de componentes que integra a cada uno de los kits con la descripción del dispositivo principal:

Tabla I

Productos del Kit “ProPanel Start” de controles industriales

Nombre del panel	Dispositivo principal	Número
Fuente de alimentación	Fuente de alimentación 24V CD	1
Protección térmica	Relé térmico	2
Pulsadores	Pulsador, paro de emergencia y selector	3
Señalizadores	Pilotos visuales y sonoro	4
Control	Relevador Industrial	5
Arranque	Contactador	6
Protecciones	Interruptor termomagnético y diferencial	7
Sensores Mecánicos	Final de carrera	8

ANÁLISIS Y RESULTADOS.

Pruebas y validación: Con el propósito de evaluar la efectividad de los paneles didácticos desarrollados, se implementaron estrategias específicas para medir cuatro indicadores clave:

1. Reducción del tiempo de práctica
2. Costo accesible y valor agregado frente a productos comerciales
3. Nivel de logro de competencias prácticas
4. Satisfacción de usuarios (estudiantes y docentes)

La validación consistió en la realización de 10 prácticas, asegurando que los resultados reflejen de manera confiable el impacto de los paneles en la formación técnica, para estos análisis se consideraron 20 participantes, 9 estudiantes de Ingeniería mecatrónica, 9 estudiantes de Ingeniería automotriz y 2 docentes;

1. Reducción del tiempo de práctica

Definición: medición del tiempo requerido para completar una práctica desde la conexión inicial hasta la verificación de funcionamiento.

Expectativa: con el uso de paneles, se espera una reducción del 75% del tiempo de conexión en comparación con el método sin el uso de un equipo didáctico.

Resultado: Trabajaron 5 equipos de 4 participantes cada equipo y se cronometraron los tiempos de ejecución de 10 prácticas representativas de control industrial, comparando el desempeño entre el método tradicional (sin panel didáctico) y el método optimizado con el uso de los paneles didácticos desarrollados. Los tiempos registrados corresponden a la etapa de conexión y verificación funcional de cada práctica, realizadas por estudiantes de ingeniería en condiciones controladas de laboratorio. Los resultados se resumen en la siguiente [tabla II](#) donde se encuentran el nombre de cada practica en la primera columna, el método en la segunda y de la tercera columna a la séptima, se muestran los minutos que dedico cada equipo conformado por 4 personas ya sea con método sin panel y con panel, calculado en la última columna el porcentaje de tiempo que se redujo por práctica.

Tabla II

Registros de tiempos de conexión por equipo

Práctica	Método	E1	E2	E3	E4	E5	Reducción promedio por práctica
1. Arranque con un botón (ca)	Sin panel	20	22	19	21	18	
	Con panel	4.0	4.2	3.8	4.5	3.5	80%
2. Arranque con un botón y enclavamiento (ca)	Sin panel	25	26	24	27	23	
	Con panel	6.3	6.0	6.5	7.0	5.8	75%
3. Start, stop y paro de emergencia (ca)	Sin panel	30	32	28	31	29	
	Con panel	7.5	8.0	7.0	7.8	6.7	75%
4. Start, stop, paro de emergencia y relé térmico (ca)	Sin panel	35	37	34	36	33	
	Con panel	10.5	11.0	10.0	11.5	9.5	70%
5. Start, stop, paro de emergencia y relé térmico (cd)	Sin panel	25	27	24	26	23	
	Con panel	5.0	5.5	4.8	5.2	4.5	80%
6. Start, stop, paro de emergencia, relé térmico y limit switch (cd)	Sin panel	40	42	38	41	39	
	Con panel	16.0	17.0	15.5	16.5	15.0	60%
7. Start, stop, paro de emergencia, relé térmico, limit switch, pilotos led (cd)	Sin panel	35	36	34	37	33	
	Con panel	7.0	7.5	6.8	7.2	6.5	80%
8. Control de dos motores	Sin panel	40	42	38	41	39	
	Con panel	12.0	12.5	11.5	13.0	11.0	70%
9. Automatización con electroválvulas y cilindros de simple efecto	Sin panel	30	32	29	31	28	
	Con panel	6.0	6.5	5.8	6.2	5.5	80%

10. Automatización con electroválvulas y cilindros de doble efecto	Sin panel	35	37	34	36	33	
	Con panel	8.8	9.0	8.5	9.2	8.0	75%

En la [tabla III](#) se calcula el promedio de minutos de todos los equipos por práctica y el porcentaje de reducción de tiempo total:

Tabla III

Comparación promedio del tiempo de prácticas con y sin paneles didácticos

Número y nombre de la práctica	Tiempo sin panel (min)	Tiempo con panel (min)	Reducción (%)
1. Arranque con un botón (ca)	20	4.0	80%
2. Arranque con un botón y enclavamiento (ca)	25	6.3	75%
3. Start, stop y paro de emergencia (ca)	30	7.5	75%
4. Start, stop, paro de emergencia y relé térmico (ca)	35	10.5	70%
5. Start, stop, paro de emergencia y relé térmico (cd)	25	5.0	80%
6. Start, stop, paro de emergencia, relé térmico y limit switch (cd)	40	16.0	60%
7. Start, stop, paro de emergencia, relé térmico, limit switch, pilotos led (cd)	35	7.0	80%
8. Control de dos motores	40	12.0	70%
9. Automatización con electroválvulas y cilindros de simple efecto	30	6.0	80%
10. Automatización con electroválvulas y cilindros de doble efecto	35	8.8	75%

Se calcula un promedio general de todos los porcentajes resultantes de cada práctica mostrados en la cuarta columna de la [tabla III](#), la implementación de los paneles didácticos permitió una reducción promedio del 74% en el tiempo de conexión comparado con el método sin panel. Este ahorro temporal se debe a la estandarización de conexiones: Los conectores tipo banana y la simbología grabada eliminaron la necesidad de pelar cables, buscar terminales o interpretar diagramas físicos repetitivos.

2. Costo accesible y valor agregado frente a productos comerciales

Definición: análisis de la cantidad de recursos necesarios, la disponibilidad de equipos y materiales para cada práctica, así como la comparación de costos con paneles comerciales, ya que se conforma de un kit de 8 paneles para realizar las prácticas de controles industriales básicos anteriormente mencionados.

Expectativa: los paneles desarrollados conforman un kit de aproximadamente \$6,300 que ofrecen una mayor accesibilidad para grupos numerosos de estudiantes y reducen los costos de adquisición hasta en un 70% frente a sistemas comerciales con dispositivos similares que se nombran en la [tabla IV](#), e incluso el kit "ProPanel Start" usa más dispositivos de los que contienen otros kits, así como interruptores diferenciales o relés térmicos.

Resultado: se realizó un análisis de costos que incluye desde el material, la mano de obra y conocimientos especializados en manejo de dispositivos electromecánicos, así como en el uso de softwares CAD y corte láser, por lo que se toma este valor como referencia para compararlo con otros paneles de funciones y dispositivos similares como se observa en la [tabla IV](#):

Tabla IV

Tabla Comparativa: Kit "ProPanel Start" vs Kits de Módulos Comercial

Fabricante / producto	Precio (usd)	Precio (mxn)	Componentes incluidos	Características
ProPanel Start	\$360	\$6,300	Fuente 24V CD, relé térmico, pulsadores, paro emergencia, selector, pilotos visuales/sonoros, relevador, contactor, interruptor termomagnético, diferencial, final de carrera.	<ul style="list-style-type: none"> - Precio ultra competitivo. - Manuales y prácticas incluidas. - Portabilidad y diseño educativo. - Seguridad mejorada (conectores banana).
Lucas Nuelle EMHP 2	\$850	\$14,875	Fuente, contactores, relés, pulsadores, interruptores, pilotos.	<ul style="list-style-type: none"> - Calidad industrial. - Módulos intercambiables.
Edibon EECN-CP	\$1,200	\$21,000	Fuente, contactores, relés, pulsadores, sensores básicos, software de simulación.	<ul style="list-style-type: none"> - Incluye software de simulación. - Enfoque en prácticas básicas.
TecEquipment EMON-A	\$980	\$17,150	Fuente, contactores, relés, pulsadores, cargas resistivas, medidores.	<ul style="list-style-type: none"> - Diseño robusto. - Ideal para demostraciones en aula.
Didacta Industrial RL-100	\$600	\$10,500	Fuente, contactores, relés, pulsadores, interruptores, pilotos.	<ul style="list-style-type: none"> - Precio menor que otros comerciales. - Componentes industriales.
SMC Systems M1010	\$720	\$12,600	Fuente, válvulas neumáticas, cilindros, sensores, pulsadores.	<ul style="list-style-type: none"> - Enfoque en neumática básica. - Kit completo para prácticas.

La comparativa con paneles didácticos comerciales confirma que la solución, con un costo de \$6,300 MXN (\$360 USD), es hasta 3 veces más económica que alternativas como el Edibon EECN-CP (\$21,000 MXN) o el TecEquipment EMON-A (\$17,150 MXN), manteniendo componentes equivalentes (fuente, contactores, relés, pulsadores, etc.). Sin embargo, a diferencia de los productos comerciales diseñados para entornos industriales y con precios elevados por su robustez, ProPanel Start integra valor educativo agregado: portabilidad, conectores banana para seguridad, manuales pedagógicos y simbología IEC grabada, elementos ausentes en todos los competidores analizados.

3. Nivel de logro de competencias prácticas

Definición: evaluación del grado en que los estudiantes logran completar las competencias prácticas, incluyendo cableado, interpretación de simbología eléctrica y manejo de componentes electromecánicos.

Expectativa: los paneles facilitan la adquisición de competencias técnicas alineadas con las necesidades de la industria moderna, mejorando tanto el desempeño procedimental como el aprendizaje conceptual.

Resultado: Se utilizó el instrumento de evaluación, una rúbrica de desempeño (0-100pts) que muestra sus detalles en la siguiente [tabla V](#):

Tabla V

Rúbrica de evaluación del aprendizaje práctico

Categoría	Criterio de evaluación	Puntuación (pts)	Ejemplo de evidencias
Cableado (40 pts)	Orden y limpieza	0-10	Cableado organizado, sin cruces innecesarios, uso de canaletas.
	Uso de herramientas adecuadas	0-10	Empleo correcto de pelacables, destornilladores, multímetro.
	Seguridad (normas IEC)	0-10	Conexiones a tierra, evitación de cortocircuitos, uso de protecciones.
	Conexiones firmes y correctas	0-10	Terminales ajustados, sin cables sueltos, polaridad respetada.
Interpretación de diagrama y simbología eléctrica (30 pts)	Identificación de componentes (contactores, relés, pulsadores, etc.)	0-15	Nombra correctamente cada símbolo en un diagrama.
	Seguimiento de diagramas eléctricos	0-15	Monta el circuito siguiendo fielmente el diagrama proporcionado.
Manejo de componentes electromecánicos (30 pts)	Montaje correcto de dispositivos	0-10	Coloca contactores, relés y pulsadores en rieles de forma segura.
	Pruebas de funcionamiento	0-10	Verifica arranque, paro y enclavamiento sin fallas.
	Diagnóstico de fallas básicas	0-10	Identifica y corrige errores (ej: cable suelto, fusible quemado).

Donde existe una escala de puntuación total, donde se muestra el nivel de desempeño de la siguiente forma: 0-50 pts se considera un desempeño insuficiente (requiere reforzamiento), 51-70 pts para un desempeño aceptable (cumple con lo mínimo), 71-85 pts es un desempeño bueno (aplica conocimientos con pocos errores) y 86-100 pts es proporcional a un desempeño excelente (domina competencias sin errores).

La [tabla VI](#) compara el desempeño de 20 participantes en tres escenarios de aprendizaje, el primero sin panel didáctico, los resultados en promedio fueron 59.2/100 un desempeño aceptable, la limitación fue que los estudiantes manipularon dispositivos físicos con mayor dificultad por no tener un medio didáctico, lo que redujo su comprensión práctica.

También se realizó con paneles didácticos, donde el puntaje promedio fue de 90.5/100 con un desempeño excelente, ya que los estudiantes al contar con un medio didáctico con panel, se logró

mejor comprensión de las competencias prácticas, destinando el tiempo a comprender el funcionamiento del diagrama eléctrico y no tanto al tiempo dedicado a realizar conexiones físicas. Después de esta prueba contando con un medio didáctico, se realizó una práctica dentro de un entorno real, con gabinetes o tableros industriales donde tenían que demostrar las mismas competencias, se tuvo un puntaje promedio de 88.4/100, mostrando un desempeño excelente, ya que existe una transferencia eficaz de la aplicación de las competencias prácticas dentro de entornos industriales reales.

Tabla VI

Tabla de evaluación comparativa en logro de competencias prácticas

Estudiante	Puntaje con panel (0-100 pts)	Nivel práctico	Puntaje sin panel (0-100 pts)	Nivel teórico	Puntaje en tablero real industrial (0-100 pts)	Mejora respecto a sin panel didáctico (%)
1	92	Excelente	58	Aceptable	90	34.00%
2	88	Excelente	55	Aceptable	87	33.00%
3	95	Excelente	60	Aceptable	92	35.00%
4	84	Bueno	50	Aceptable	82	34.00%
5	90	Excelente	62	Aceptable	88	28.00%
6	87	Excelente	57	Aceptable	85	30.00%
7	82	Bueno	48	Aceptable	80	34.00%
8	96	Excelente	65	Aceptable	94	31.00%
9	89	Excelente	59	Aceptable	87	30.00%
10	93	Excelente	61	Aceptable	91	32.00%
11	85	Bueno	52	Aceptable	83	33.00%
12	91	Excelente	64	Aceptable	89	27.00%
13	83	Bueno	49	Aceptable	81	34.00%
14	97	Excelente	68	Aceptable	95	29.00%
15	86	Excelente	54	Aceptable	84	32.00%
16	94	Excelente	63	Aceptable	92	31.00%
17	81	Bueno	45	Insuficiente	79	36.00%
18	98	Excelente	70	Aceptable	96	28.00%
19	99	Excelente	72	Bueno	97	27.00%
20	100	Excelente	75	Bueno	98	25.00%
Promedio	90.5		59		88.5	31.15%

Los resultados demuestran que el uso de paneles didácticos mejora significativamente el desempeño práctico de los estudiantes en un 31.15% de los que usaron el panel con respecto a los que no. Quienes utilizaron los paneles alcanzaron un promedio de 90.5 pts un nivel excelente, superando por más de 40 puntos a los que practicaron sin panel de 59 pts. Practicando en entornos industriales reales, el grupo con experiencia en manejo físico con los paneles mostró un promedio de 88.5% en sus competencias. El 80% de los usuarios alcanzó nivel excelente con los paneles, confirmando su efectividad para desarrollar habilidades técnicas y prácticas alineadas con las necesidades industriales.

4. Satisfacción de los usuarios (estudiantes y docentes)

Definición: medición de la percepción de estudiantes y docentes sobre la facilidad de uso, la utilidad pedagógica y adquisición de competencias prácticas.

Expectativa: al menos el 80% de los usuarios manifiesta satisfacción positiva de una escala del 1 Mala al 5 Excelente, con una muestra de 20 participantes.

Resultados: La [tabla VII](#) resume los resultados de una encuesta aplicada a 20 usuarios (estudiantes y docentes) que utilizaron los paneles didácticos. La encuesta evalúa 10 aspectos clave sobre la usabilidad y el impacto educativo de los paneles, usando una escala del 1 al 5 (Mala a Excelente).

Tabla VII

Encuesta de satisfacción: Paneles didácticos para control industrial

Pregunta	Mala (1)	Regular (2)	Neutral (3)	Buena (4)	Excelente (5)	Puntuación promedio
1. Facilidad para realizar conexiones eléctricas	0	0	1	9	10	4.5
2. Comprensión de la simbología IEC y diagramas eléctricos	0	1	2	10	7	4.2
3. Confianza en el manejo de componentes (relés, contactores, pulsadores)	1	1	3	9	6	3.9
4. Utilidad para diagnosticar y resolver fallas	0	1	4	10	5	4.0
5. Preparación para entornos industriales reales	0	0	2	12	6	4.2
6. Satisfacción general con el diseño y portabilidad del panel	0	0	1	6	13	4.6
7. Ahorro de tiempo en la elaboración de prácticas	0	0	2	8	10	4.4
8. Calidad de los manuales y guías de prácticas	1	1	3	8	7	4.0
9. Seguridad percibida durante el uso del panel	0	0	1	7	12	4.6
10. Impacto en el interés por la industria y la tecnología	0	0	3	9	8	4.3

Se muestra una gráfica realizada en Python, [Figura 3](#), para una mejor visualización de los resultados de la encuesta de satisfacción realizada por 20 participantes, utilizando la escala de mala a (1) a excelente (5).

Resultados de satisfacción: Paneles didácticos (n=20 participantes)

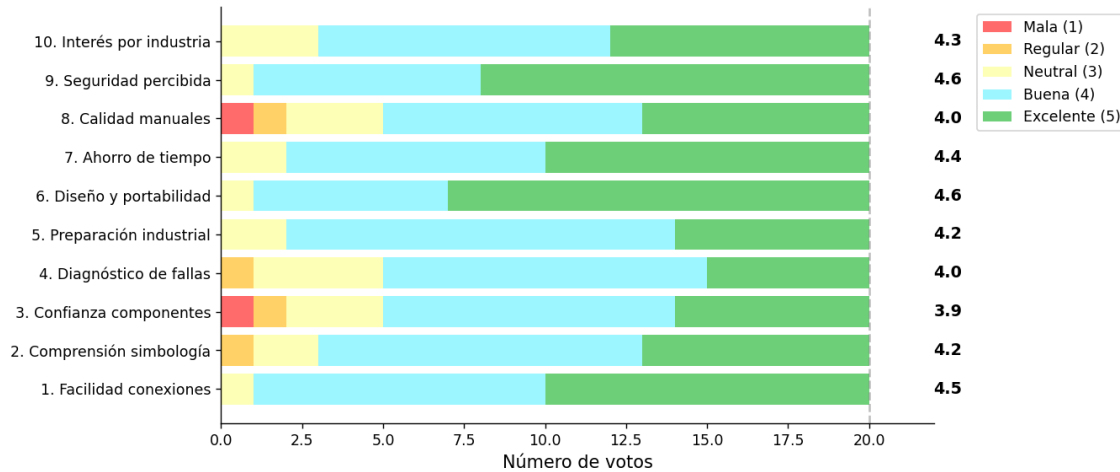


Figura 3. Representación de los resultados de satisfacción por 20 participantes.

La encuesta aplicada a 20 usuarios confirma una alta satisfacción con los paneles didácticos, destacándose la facilidad para conexiones eléctricas (10 votos "Excelente"), diseño y portabilidad (13 votos "Excelente") y seguridad percibida (12 votos "Excelente"). La puntuación promedio global de 4.3/5 refleja una percepción positiva en todos los aspectos, aunque se identificó una oportunidad de mejora en la confianza para manejar componentes (solo 6 votos "Excelente"), lo que sugiere la necesidad de incorporar más ejercicios prácticos de identificación y montaje. Estos resultados validan que los paneles no solo optimizan el tiempo y la seguridad, sino que también motivan el interés por la industria (8 votos "Excelente" en impacto), cumpliendo con su objetivo de cerrar brechas entre trabajar únicamente solo teoría, simulaciones o sin paneles didácticos, a con material especialmente diseñado para favorecer la calidad del aprendizaje.

La [tabla VIII](#) resume los 4 resultados clave del proyecto de paneles didácticos, integrando datos de satisfacción de usuarios (4.3/5), mejora el logro de obtención de competencias prácticas (90.5 pts con panel vs. 59 pts sin panel), reducción de tiempo de conexión (74%), costo y valor agregado (hasta 3 veces más económico que alternativas comerciales). Los datos demuestran que los paneles no solo optimizan recursos educativos, sino que cierran brechas entre trabajar sin un medio didáctico a una forma completamente didáctica e industrial, validando su impacto en la formación técnica accesible y de calidad, se muestra cómo se utilizan en la [figura 4](#).



Figura 4. Prácticas realizadas en paneles montados en soportes especiales.

Tabla VIII

Resultados clave del proyecto de paneles didácticos

Indicador	Resultado	Impacto
Satisfacción de usuarios	4.3/5 (Promedio global)	65-85% de votos "Excelente" en facilidad, seguridad y diseño.
Nivel de logro de competencias prácticas	90.5 pts (Con panel) vs. 59.2 pts (Sin panel)	80% de estudiantes alcanzaron nivel excelente con uso de panel respecto al método sin panel.
Reducción de tiempo	74% menos tiempo de conexión	Prácticas básicas redujeron tiempo de 20 min a 4 min en promedio.
Costo y valor agregado	\$6,300 MXN vs. \$12,600-\$21,000 MXN (competencia)	De 2 a 3 veces más económico que paneles comerciales con dispositivos equivalentes a un 80%.

CONCLUSIONES.

El desarrollo del sistema de paneles didácticos para la enseñanza de control industrial demostró ser una solución práctica, accesible y alineada con los requerimientos de la Industria 4.0 y el IIoT. Los resultados obtenidos confirman una reducción promedio del 74% en los tiempos de conexión, optimizando significativamente el uso del laboratorio y permitiendo capacitar a un mayor número de estudiantes en menor tiempo.

Asimismo, el análisis comparativo evidenció que los paneles "ProPanel Start" son entre dos y tres veces más económicos que las alternativas comerciales, con la ventaja de integrar un mayor número de componentes como interruptores diferenciales y relés térmicos que en muchos casos no están presentes en los equipos similares disponibles en el mercado. Esto los convierte en una opción más completa, segura y viable para instituciones educativas con recursos limitados.

En términos de competencias, los estudiantes alcanzaron un promedio de 90.5/100 puntos con el uso de paneles, frente a 59/100 sin ellos, validando su eficacia para fortalecer el dominio de habilidades prácticas y su transferencia hacia entornos industriales reales. Además, la satisfacción de los usuarios obtuvo una valoración global de 4.3/5, destacando la facilidad de uso, la portabilidad y la seguridad del sistema.

En conjunto, estos resultados evidencian que el sistema de paneles didácticos no solo optimiza tiempo y recursos, sino que también eleva el nivel formativo, fomenta el interés por la industria y cierra la brecha tecnológica entre teoría y práctica. Con ello, se establecen bases sólidas para escalar el proyecto hacia más prácticas y módulos especializados, consolidando un modelo replicable en otras instituciones públicas de México y Latinoamérica.

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco profundamente a la Universidad Politécnica de Pénjamo por el apoyo brindado mediante el uso de sus espacios, equipos y herramientas.

De manera especial, al Ing. Javier Gutiérrez González, director de Carrera, y a mi asesor, el Mtro. José de Jesús Mendoza Osorio, por su orientación y respaldo constante.

Extiendo mi gratitud a los estudiantes de los programas educativos de Ingeniería Mecatrónica y Automotriz, quienes participaron en el diseño, ensamblaje y validación de los paneles didácticos, contribuyendo con su esfuerzo en la creación de bases que facilitan y generan mayor comodidad y visibilidad en las conexiones.

Agradezco sinceramente a todos los involucrados por ser parte fundamental de este proyecto, contribuyendo a cerrar la brecha entre el aula y la Industria 4.0, y demostrando que, con colaboración y compromiso, la educación puede transformarse en una verdadera experiencia de innovación y futuro.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Kagermann, H., Wahlster, W. y Helbig, J. (2013). *Recomendaciones para la implementación de la iniciativa estratégica INDUSTRIA 4.0*. Acatech.
- [2] UNESCO. (2017). *Competencias digitales para la vida y el trabajo*. UNESCO Publishing.
- [3] Gutiérrez González, J. (2022). *Diagnóstico del equipamiento en laboratorios de ingeniería mecatrónica*. Universidad Politécnica de Pénjamo.
- [4] Foro Económico Mundial. (2020). *Informe sobre el futuro del empleo 2020*. WEF.
- [5] Sánchez, M. y López, R. (2019). *Desafíos en la modernización de laboratorios educativos en México*. *Revista Iberoamericana de Educación*, 80(1), 45-62.
- [6] Mendoza Osorio, J. J. (2021). *Seguridad y eficiencia en laboratorios de control industrial*. *Memorias del Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica*.
- [7] OCDE. (2018). *Educación y competencias para la economía digital*. OECD Publishing.
- [8] Torres, P. y Ramírez, L. (2020). *Innovación educativa con tecnologías accesibles*. *Revista de Pedagogía Tecnológica*, 15(2), 112-130.
- [9] Hernández, A. y García, E. (2021). *Diseño de prototipos didácticos para la automatización industrial*. *Journal of Engineering Education*, 34(4), 78-95.
- [10] Silva, J. y Fernández, K. (2019). *Optimización de tiempos en prácticas de laboratorio mediante módulos didácticos*. *Revista de Innovación Educativa*, 22(3), 201-215.
- [11] Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). *La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*.

ESTUDIO AB INITIO DE CALIXARENO PARA SU USO EN SENSORES DE GASES CONTAMINANTES



ESTUDIO AB INITIO DE CALIXARENO PARA SU USO EN SENSORES DE GASES CONTAMINANTES

Héctor A. Gómez-Álvarez ¹, Oleksiy V. Shulika ¹

¹Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Carr.
Salamanca-Valle Km 3.5+1.8, Comunidad de Palo Blanco, 36700 Salamanca, Gto., México

Correo electrónico del autor de contacto: ha.gomezalvarez@ugto.mx

RESUMEN

El desarrollo de materiales capaces de absorber y detectar gases contaminantes es clave para mejorar la calidad del aire. Este estudio explora complejos metal-orgánicos basados en calixareno para la captura y detección de monóxido de carbono, dióxido de azufre, ozono y óxidos de nitrógeno, gases tóxicos generados principalmente por la quema de combustibles fósiles. Utilizando la Teoría del Funcional de la Densidad, y su versión dependiente del tiempo, se analiza la interacción entre el calixareno y metales de transición, evaluando su estabilidad estructural y su afinidad con dichos gases. Se espera que los complejos metal-calixareno presenten mayor afinidad por las moléculas de gases contaminantes que los calixarenos sin metal, junto con alteraciones espectroscópicas que faciliten su detección. La combinación de análisis estructurales, vibracionales y ópticos brindará información clave sobre la viabilidad de estos materiales como sensores. Este trabajo busca contribuir al desarrollo de tecnologías sostenibles para la vigilancia ambiental, ofreciendo alternativas innovadoras en la detección de contaminantes atmosféricos mediante sensores ópticos eficientes.

Palabras clave: DFT, calixareno, gases contaminantes

1. INTRODUCCIÓN

Los calixarenos están contruidos a partir de unidades fenólicas, pertenecientes a la familia de compuestos macrocíclicos, y exhiben una cavidad en forma de cono, estabilizada por interacciones de enlace de hidrógeno en el borde inferior, que actúa como un anfitrión molecular. Por lo tanto, son ampliamente utilizados como una plataforma ideal en muchas aplicaciones, tales como detección y adsorción [1][2]. Debido a que numerosos estudios, reportados en la literatura científica, alteran la selectividad de los calixarenos cambiando los grupos funcionales en el borde inferior, entre las aplicaciones más interesantes, podemos encontrar la formación de complejos catiónicos con iones de metal de transición, producido para obtener sensores selectivos [3].

METODOLOGIA

Los cálculos teóricos de esta investigación se realizaron usando la Teoría del Funcional de la Densidad (DFT) [4] tal como se implementa en el software GAMESS [5]. Para efectos de este estudio, se utilizaron dos estructuras huésped para investigar las propiedades de adsorción y detección de la molécula de monóxido de carbono (CO), el p-tert-Butilcalix [4] areno (PTBC [4]) y el PTBC [4] formando un complejo químico con Fe (PTBC [4] + Fe). En los cálculos de DFT, el funcional híbrido wB97X-D se utilizó en la etapa de optimización estructural aprovechando los efectos de las energías de intercambio y correlación, incluida la dispersión [6][7]. El funcional B3LYP [8], que describe con bastante precisión las excitaciones localizadas en moléculas orgánicas, fue utilizado en los cálculos de Teoría del Funcional de la Densidad Dependiente del Tiempo (TD-DFT) para el coeficiente de absorción molar.

ANÁLISIS Y RESULTADOS

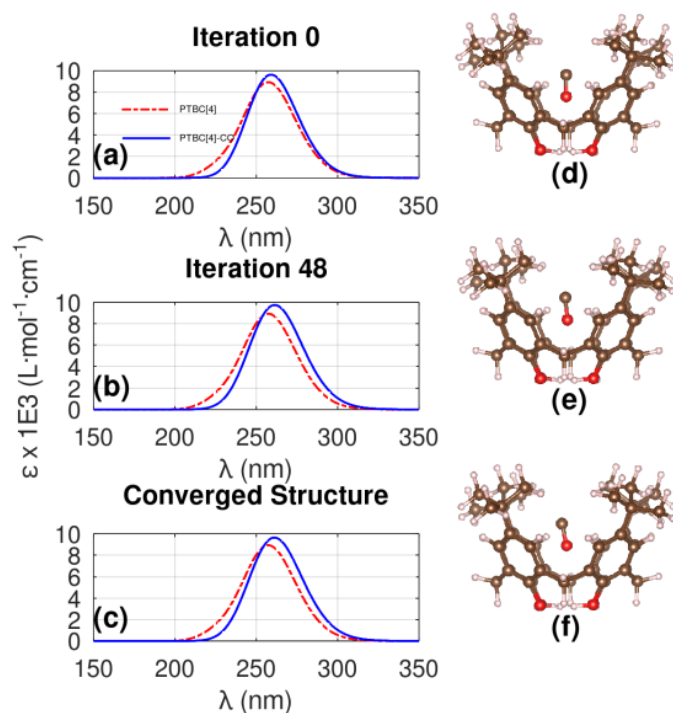


Figura 1: Coeficiente de absorción molar de estructura optimizada de PTBC [4] (línea roja) y espectros de PTBC [4] - CO (línea azul) en la estructura inicial (a), la configuración con corrección de la matriz hessiana (b) y con la estructura optimizada (c), y sus respectivas estructuras moleculares (d), (e) y (f).

La interacción entre PTBC [4] y la molécula de CO conduce a un aumento notable en el coeficiente de absorción molar comparado con el calixareno aislado. Esto indica una mayor capacidad de absorción de luz en la formación del complejo anfitrión-huésped. Además, la presencia de CO altera sutilmente el entorno electrónico de los grupos fenólicos en PTBC [4], que participan en interacciones débiles -probablemente enlaces de hidrógeno o fuerzas de van der Waals- con la molécula de CO entrante. Esta interacción produce un ligero desplazamiento hacia el rojo del espectro de absorción, lo que significa que la longitud de onda máxima de absorción se desplaza a valores más altos. Al mismo tiempo, hay una modesta reducción en el ancho total a la mitad del máximo (FWHM), lo que sugiere una transición electrónica más

definida y posiblemente más rígida tras la complejación. Estos cambios espectrales, que incluyen tanto el desplazamiento de la posición del pico como la variación de la anchura espectral, se resumen cuantitativamente en la [Tabla I](#) y pueden apreciarse visualmente en la [Figura 1](#), donde se comparan los perfiles de absorción de ambos sistemas.

Tabla I: λ_{max} y FWHM de la optimización rutinaria de PTBC [4] y PTBC [4] - CO.

Sistema Molecular	λ_{max} (nm)	FWHM (nm)
PTBC[4] Estructura convergida	257.51	39.24
PTBC[4]-CO Iteración 0	259.11	36.84
PTBC[4]-CO Iteración 47	261.31	38.64
PTBC[4]-CO Estructura convergida	261.31	38.64

Los sistemas moleculares PTBC [4] + Fe y PTBC [4] + Fe - CO, representados en la [Figura 2](#), fueron sometidos a una optimización estructural completa bajo idénticas condiciones computacionales. En estos cálculos, el conjunto de bases LANL2DZ se empleó específicamente para describir el centro de hierro (Fe), debido a su idoneidad para los metales de transición y la compatibilidad con los potenciales efectivos del núcleo (ECPs). Para construir los complejos metal-ligando, se modificó la estructura inicial de PTBC [4] sustituyendo cada átomo de hidrógeno de los grupos fenólicos -OH con enlaces de coordinación a un ión Fe, permitiendo que el hierro interactuara directamente con los átomos de oxígeno donadores de electrones del

calixareno. Esta sustitución imita un proceso de desprotonación y da lugar a un complejo de coordinación metal-ligando. En el caso de PTBC [4] + Fe , esta modificación introduce un cambio significativo en la estructura electrónica: la multiplicidad de espín aumenta, reflejando la presencia de electrones no emparejados en el centro del hierro, lo que es consistente con su configuración de alto espín d5. Además, la carga neta del sistema se convierte en -1, lo que indica la influencia tanto de la desprotonación como de la carga formal del ion hierro. Estas características son cruciales para comprender la interacción subsiguiente con la molécula de CO en el sistema PTBC [4] + Fe - CO y para interpretar el comportamiento electrónico y espectroscópico de los complejos resultantes.



Figura 2: Sistemas moleculares optimizados. Los átomos blancos, rojos, marrones y morados representan H, O, C y Fe, respectivamente.

Para determinar con precisión la multiplicidad de espín del sistema molecular PTBC [4] + Fe, realizamos un análisis comparativo calculando la energía total de la estructura completamente relajada bajo diferentes estados de espín: multiplicidades 2 (doblete), 4 (cuarteto) y 6 (sexteto). Los resultados de estos cálculos se presentan en la [Tabla II](#). Entre los estados evaluados, la configuración de cuarteto (multiplicidad 4) produjo la energía electrónica total más baja, lo que indica que representa la forma más termodinámicamente estable del sistema bajo las condiciones teóricas aplicadas. De acuerdo con el principio de energía mínima, que establece que un sistema tiende a adoptar la configuración de menor energía disponible, concluimos que el estado del cuarteto es más estable que las configuraciones de doblete y sexteto. Es probable que esta estabilidad esté asociada con la configuración electrónica del ion Fe y su interacción con el entorno de ligando proporcionado por los grupos fenólicos desprotonados del andamio

calixareno. En consecuencia, seleccionamos la estructura PTBC [4] + Fe optimizada para cuartetos como la geometría de referencia para los cálculos posteriores que involucran la interacción entre el complejo calixareno-hierro y la molécula de CO, garantizar que las simulaciones posteriores reflejen la configuración del sistema más realista y energéticamente favorable.

Tabla II: Energía del sistema molecular PTBC[4] + Fe con multiplicidad 2, 4 y 6.

Sistema Molecular	Energía (hartree)
Multiplicidad 2 (doblete)	-2131.9608
Multiplicidad 4 (cuarteto)	-2132.0167
Multiplicidad 6 (sexteto)	-2131.9699

Las energías de interacción calculadas entre los sistemas a base de calixareno y la molécula de CO indican una fuerza de interacción comparable en todos los complejos estudiados, lo que sugiere que la presencia del ion Fe no altera drásticamente la afinidad de enlace global hacia la molécula de gas. Como se muestra en la [Tabla III](#), tanto el calixareno desnudo como el complejo coordinado por metal muestran tendencias similares en sus energías de interacción con CO, lo que implica que la incorporación del metal influye principalmente en la estructura electrónica, como se ve en las brechas de energía reducidas, pero sólo tiene un efecto moderado sobre las energías de interacción. En consecuencia, la adición del ion Fe no afecta significativamente el comportamiento de absorción molecular asociado con la unión al CO.

Tabla III: Energía de absorción de los sistemas moleculares de calixarenos en interacción con la molécula de CO.

Sistema Molecular	Energía (eV)
PTBC[4]-CO	0.5724
PTBC[4]+Fe-CO	0.5167

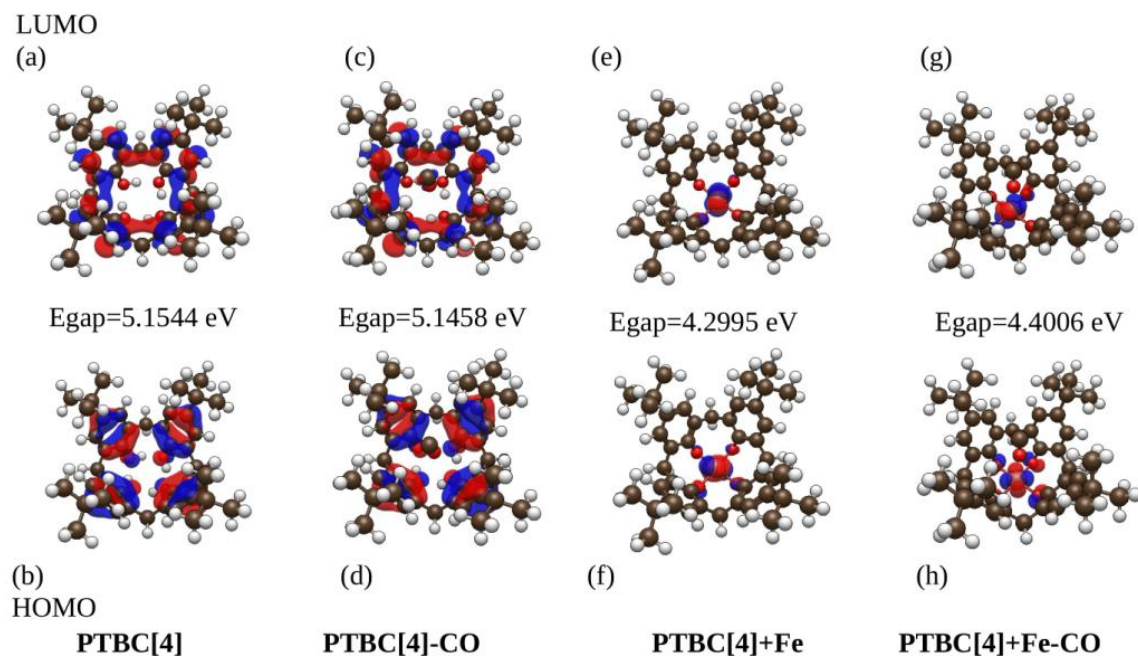


Figura 3: Los orbitales LUMO (a), (c), (e) y (g) y HOMO (b), (d), (f) y (h) y las energías de la banda prohibida de los sistemas moleculares: calixarenos prístino y calixarenos que interactúan

con la molécula de CO. El color azul representa la fase positiva, mientras que el rojo indica la fase negativa de los orbitales moleculares.

La visualización de los orbitales moleculares fronterizos (HOMO y LUMO) para los cuatro sistemas PTBC [4], PTBC [4] - CO, PTBC [4] + Fe, y PTBC [4] + Fe - CO revela cambios significativos en la estructura electrónica al interactuar tanto con CO como con Fe. Como se muestra en la [Figura 3](#), el PTBC [4] prístino exhibe orbitales π - π^* deslocalizados distribuidos principalmente a través de los anillos aromáticos, con una brecha energética relativamente alta de 5.1544 eV, indicativa de baja reactividad electrónica. La inclusión de CO induce solo una ligera perturbación en la distribución electrónica y una disminución marginal en la brecha energética (5.1458 eV), lo que sugiere una interacción débil. En contraste, la coordinación con Fe modifica drásticamente la topología orbital, concentrando la densidad electrónica cerca del centro del metal y reduciendo significativamente el espacio de banda a 4.2995 eV. Esta reducción refleja un aumento de la polarizabilidad electrónica y las características potenciales de transferencia de carga. La interacción subsiguiente con el CO aumenta ligeramente la diferencia a 4.4006 eV, lo que indica una ligera estabilización del sistema, probablemente por donación de nuevo o redistribución electrónica que implica el metal y el CO. Estas tendencias resaltan la sensibilidad del marco calixareno tanto a la coordinación de metales como a la interacción de gases, reforzando su potencial como plataforma de detección sintonizable.

CONCLUSIONES

El sistema molecular PTBC [4] muestra notables cambios en su coeficiente de absorción molar al interactuar con la molécula de CO, principalmente debido a las interacciones débiles que involucran los grupos fenólicos del calixareno. Esta interacción da como resultado un ligero desplazamiento al rojo en el espectro de absorción y una FWHM más estrecha, lo que indica una transición electrónica más definida. Cuando un ion Fe se incorpora al sistema coordinándose con los grupos -OH desprotonados, hay una reducción significativa en la brecha de energía, como lo confirma el análisis orbital de frontera. Aunque la adición del centro metálico no altera

drásticamente la energía de absorción, introduce una reorganización electrónica notable y aumenta la sensibilidad del sistema a otras interacciones. La interacción subsiguiente del complejo PTBC [4] + Fe con el CO conduce a una ligera estabilización de la LUMO y un aumento moderado en la brecha energética. En general, estos efectos dan lugar a un desplazamiento hacia el rojo progresivamente en la longitud de onda máxima de absorción, moviendo ligeramente el perfil de absorción del sistema más cerca de la región visible. Estos hallazgos apoyan el potencial de los calixarenos funcionalizados con metal como plataformas sintonizables para la detección de gases basada en respuestas electrónicas y ópticas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la SECIHTI (CONAHCyT) por el apoyo para la beca de doctorado 4016919. Se agradece a la Universidad de Guanajuato y al Laboratorio Nacional de Caracterización de Propiedades Físicoquímicas y Estructura Molecular (UG-CONACYT – México, Proyecto: 123732) por los recursos de supercómputo.

Agradecemos también a la Sociedad internacional de óptica y fotónica (SPIE) por el apoyo recibido para presentar los resultados de investigación en el Congreso OPTICS + PHOTONICS 2025, en San Diego, California (<https://doi.org/10.1117/12.3064710>).

BIBLIOGRAFÍA

[1] Cabana, N., Schulte, E., Nuñez, J. L., and Quaino, P., “Theoretical studies of calixarene derivatives as receptors for transition metals,” *Chemical Physics Letters* 811, 140210 (2023).

[2] Yuksel, N. and Fellah, M. F., “Hydrogen adsorption and sensing properties of p-tert-butylcalix[4]arene and its transition metal complexes: A dft study,” *International Journal of Hydrogen Energy* 48(60), 23348–23361 (2023).

[3] Murphy, P., Dalgarno, S. J., and Paterson, M. J., “Transition metal complexes of calix[4]arene: Theoretical investigations into small guest binding within the host cavity,” *The Journal of Physical Chemistry A* 120(5), 824–839 (2016).

[4] Kohn, W. and Sham, L. J., “Self-consistent equations including exchange and correlation effects,” *Physical review* 140(4A), A1133 (1965).

[5] Barca, G. M. J., Bertoni, C., Carrington, L., Datta, D., De Silva, N., Deustua, J. E., Fedorov, D. G., Gour, J. R., Gunina, A. O., Guidez, E., Harville, T., Irle, S., Ivanic, J., Kowalski, K., Leang, S. S., Li, H., Li, W., Lutz, J. J., Magoulas, I., Mato, J., Mironov, V., Nakata, H., Pham, B. Q., Piecuch, P., Poole, D., Pruitt, S. R., Rendell, A. P., Roskop, L. B., Ruedenberg, K., Sattasathuchana, T., Schmidt, M. W., Shen, J., Slipchenko, L., Sosonkina, M., Sundriyal, V., Tiwari, A., Galvez Vallejo, J. L., Westheimer, B., Wloch, M., Xu, P., Zahariev, F., and Gordon, M. S., “Recent developments in the general atomic and molecular electronic structure system,” *The Journal of Chemical Physics* 152, 154102 (Apr. 2020).

[6] Chai, J.-D. and Head-Gordon, M., “Systematic optimization of long-range corrected hybrid density functionals,” *The Journal of chemical physics* 128(8) (2008).

[7] Chai, J.-D. and Head-Gordon, M., “Long-range corrected hybrid density functionals with damped atom–atom dispersion corrections,” *Physical Chemistry Chemical Physics* 10(44), 6615–6620 (2008).

[8] Becke, A. D., “Density-functional thermochemistry. iii. the role of exact exchange,” *The Journal of chemical physics* 98(7), 5648–5652 (1993).

CORRECIÓN DE CONTRASTE Y DETECCIÓN DE BORDES EN TOMOGRAFÍAS CEREBRALES MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES



CORRECCIÓN DE CONTRASTE Y DETECCIÓN DE BORDES EN TOMOGRAFÍAS CEREBRALES MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Fernando Yafferth Castillo Negrete, Laila Nadchieli Aguilar Vichido, Manuel Iván León Madrid

DCI-Campus León, Universidad de Guanajuato, León, Gto. México.

Correo electrónico del autor de contacto: fy.castillonegrete@ugto.mx

RESUMEN

El procesamiento de imágenes es una herramienta que permite la mejora de contraste y la detección de bordes, dichas técnicas son fundamentales para resaltar detalles relevantes durante las exploraciones diagnósticas. En este trabajo, se aplican distintos tipos de correcciones a una imagen de tomografía computarizada (CT) del cerebro, seguidas de filtrado espacial y aplicación de algoritmos para detección de bordes. Finalmente, se genera una máscara superpuesta para mejorar la visualización de los contornos y objetos relevantes en la imagen original. El procesamiento combinado de corrección de contraste, filtrado gaussiano y detección de bordes mediante Canny permite resaltar detalles importantes en imágenes médicas. La combinación de los bordes detectados en ambas transformaciones proporciona una representación más completa de las estructuras presentes en la imagen. Esta metodología podría ser útil en la mejora del diagnóstico por imagen y en el análisis computacional de exploraciones médicas.

Palabras clave: Procesamiento de imágenes; Tomografía computarizada; Máscara; Corrección; Detección de bordes.

1. INTRODUCCIÓN

Una operación de pixel es aquella operación hecha sobre una imagen donde cada nuevo valor del pixel es dependiente del pixel original en la misma posición e independiente de los pixeles vecinos [1]. Dentro de estas operaciones existen dos muy similares: corrección gamma y transformación logarítmica.

La corrección gamma tiene la forma presentada en la [Ecuación \(1\)](#).

$$s = cp^\gamma \quad (1)$$

donde p es el valor del pixel con c y γ como constantes. La corrección gamma es interesante debido a que dependiendo del valor de gamma (γ) la distribución de las intensidades del pixel tendrá un comportamiento distinto. Como se ve en la [Figura 1](#), con valores de gamma mayores a 1 la imagen se volverá más oscura, mientras que si son valores menores a 1 la imagen se volverá más clara.

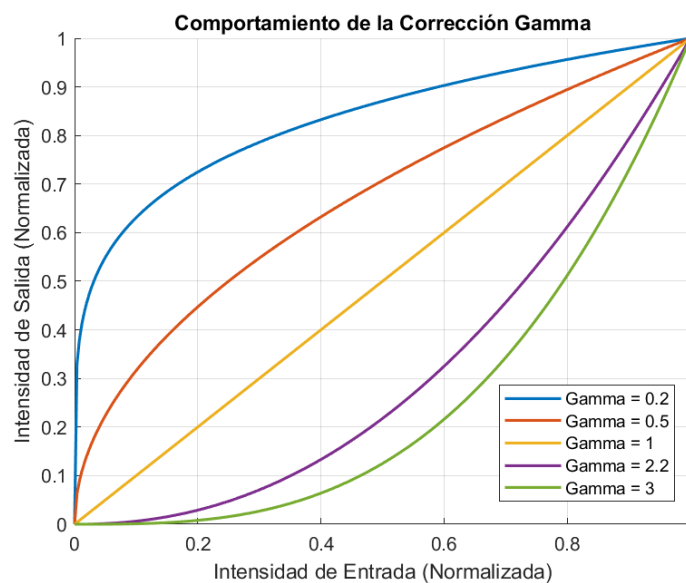


Figura 1. Gráfica que muestra el comportamiento de la corrección gamma con distintos valores de gamma. Imagen de elaboración propia.

La transformación logarítmica tiene la forma presentada en la [Ecuación \(2\)](#).

$$s = c \log(1 + p) \quad (2)$$

donde k es constante. El comportamiento de la transformación se aprecia en la [Figura \(2\)](#).

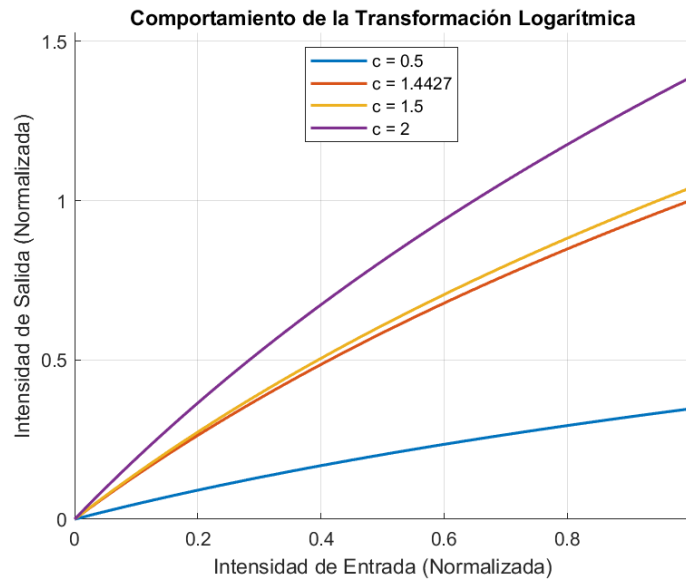


Figura 2. Gráfica que muestra el comportamiento de la transformación logarítmica con distintos valores de c. Imagen de elaboración propia.

Si bien ambas operaciones parecen iguales, se diferencian en que la transformación logarítmica tiende a polarizar más las intensidades de los píxeles hacia los tonos blancos, mientras que la transformación gamma lo hace dependiendo del valor de gamma, por lo que sus usos dependen del problema de corrección en cuestión.

El filtrado espacial es la acción de modificar los valores de cada píxel por una función de los valores de píxel y sus vecinos. Esto nos ayuda a dejar pasar, modificar o rechazar componentes de

frecuencia específicas de manera directa en una imagen [1]. Existen dos tipos de filtrado espacial: lineales y no lineales. Los filtros lineales usan la convolución que consiste en mover un kernel (o máscara) ω rotado 180° sobre una imagen f y calcular la suma de productos en cada posición [1], véase Ecuación (3). Un kernel es una matriz donde su tamaño define su vecindad de operación y sus coeficientes determinan la naturaleza del filtro [1].

$$(\omega * f)(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b \omega(s, t) f(x - s, y - t) \quad (3)$$

Uno de los filtros espaciales más utilizados es el filtro Gaussiano que se representa en la Ecuación (4). El filtro Gaussiano tiene la característica que es isotrópico, es decir, que la respuesta es independiente de la orientación [1]. En la Figura 3 se representa los valores del kernel para un filtro Gaussiano de $m \times m$. El efecto que tiene un filtro gaussiano sobre una imagen es la de hacer más suave el cambio de intensidades entre pixeles sin afectar tanto a los bordes de una imagen.

$$\omega = Ke^{-\frac{r^2}{\sigma^2}} \quad (4)$$

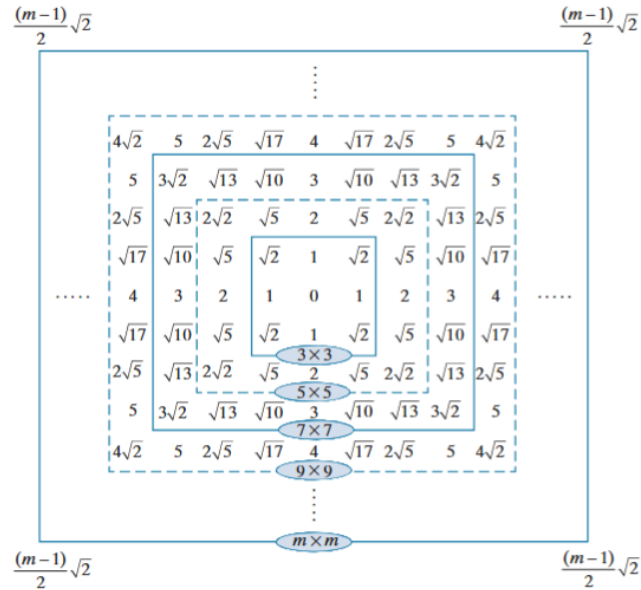


Figura 3. Matriz de filtro gaussiano para tamaños de $m \times m$. Fuente: González y Woods (2008, p. 167).

Otro tipo de filtro es el filtro Canny, que en realidad es un algoritmo de varias fases. La primera es la reducción de ruido mediante un filtro Gaussiano para eliminar altas frecuencias, el segundo es el cálculo del gradiente (Ecuación (5)), magnitud del gradiente (Ecuación (6)) y la dirección del gradiente (Ecuación (7)) para indicar el cambio de intensidad y dirección. La tercera fase es la supresión de no máximos donde se comparan los valores de magnitud en la dirección del gradiente y se conserva solo el máximo local para poder “adelgazar” los bordes para que queden de un solo píxel de grosor. Por último, la umbralización por histéresis donde se aplican dos umbrales, uno fuerte y uno débil. Se consideran fuertes cuando son mayores a la magnitud del gradiente y débiles cuando son menores a la magnitud del gradiente. Esto hace al filtro Canny uno de los mejores filtros ya que da una buena detección, buena localización y evita falsas detección [1].

$$G_x = \frac{\partial I}{\partial x}, G_y = \frac{\partial I}{\partial y} \quad (5)$$

$$M(x, y) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (6)$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \frac{G_y}{G_x} \quad (7)$$

En el procesamiento de imágenes se habla de morfología como una herramienta que nos permite extraer componentes de imágenes que son útiles para representar y describir formas de una región. Las operaciones morfológicas están definidas por conjuntos, en específico dos tipos de conjuntos de píxeles: objetos y elementos estructurales (SE) [1]. Los objetos se pueden definir como conjuntos de píxeles que están en el primer plano de la imagen, mientras que los elementos estructurales son el conjunto tanto del primer plano como del fondo de una imagen. Debido a que las operaciones morfológicas fueron en un principio hechos para imágenes binarias, se suelen usar solo en este tipo [2]. Existen dos tipos de operaciones morfológicas importantes: la erosión y la dilatación.

La erosión se define por la Ecuación (8), esta quiere decir que al erosionar una imagen binaria A con un elemento estructural B, el pixel z pertenece al resultado de la erosión si y solo si B al ser centrado en z queda completamente contenido en A [1]. Esto nos da como resultado “adelgazar” los objetos, que son subconjuntos de A, eliminando píxeles en sus bordes [2].

$$A \ominus B = \{z \in Z^2 | B_z \subseteq A\} \quad (8)$$

2. METODOLOGÍA

El presente estudio se realizó utilizando el entorno de programación MATLAB R2023a y las funciones del Image Processing Toolbox. La imagen empleada fue una tomografía computarizada (TC)

cerebral en escala de grises con una resolución de 512×512 píxeles.

Primero, se aplicó una **corrección gamma** con un valor de $\gamma = 0.6$, con el objetivo de resaltar los ventrículos cerebrales. De forma complementaria, se aplicó una **transformación logarítmica** con constante $c = 1$ para aumentar el contraste en las regiones hipodensas del encéfalo.

Posteriormente, se utilizó un **filtro gaussiano** con desviaciones estándar de $\sigma = 3$ (para la imagen corregida por gamma) y $\sigma = 6$ (para la transformada logarítmica), empleando un kernel de 5×5. En el caso de la transformación logarítmica, previamente se aplicó una operación de **erosión** con un elemento estructural de vecindad 4 para reducir el ruido.

Al considerar las imágenes suficientemente limpias para la detección, se procedió a aplicar el filtro Canny para detección de bordes a ambas imágenes (véase [Figura 7](#)). Al detectar estos bordes obtuvimos dos máscaras las cuales se sumaron para crear una sola máscara que contornee todas las estructuras del cerebro. Por último, se sobrepuso la máscara en la imagen original para comparar la eficacia del algoritmo (véase [Figura 8](#)).

Todo el procesamiento se realizó sobre la misma imagen de entrada, asegurando consistencia en las comparaciones y validez en los resultados obtenidos.

En la [Figura 4](#) se presenta la imagen original en escala de grises. Se detectan masas características que son un poco más oscuras cerca de los ventrículos (huecos negros dentro del cerebro).

Imagen original



Figura 4. Imagen original en tonos grises de la TC de cerebro. Fuente: Radiology Masterclass. “CT

Brain–Ventricles”, disponible en:

https://www.radiologymasterclass.co.uk/gallery/ct_brain/ct_brain_stacks/ventricles_ct_brain.

3. ANALISIS Y RESULTADOS

Una vez hecha la metodología se procedió a comparar la máscara creada con la imagen original (véase **Figura 8**). Se puede apreciar en la imagen que no todos los segmentos que se detectan en la máscara coinciden con los contornos de las estructuras del cerebro, sin embargo, se llega a dividir bien los ventrículos, las masas oscuras (núcleos basales) y el cráneo.

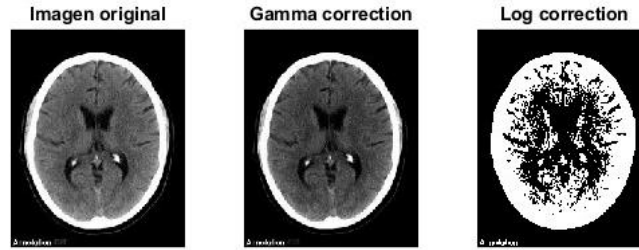


Figura 5. Comparativa entre la imagen original (izquierda), la imagen corregida por gamma (centro) y la transformada logarítmica (derecha). Se observa que la corrección gamma mejora la visibilidad de los ventrículos, mientras que la transformación logarítmica resalta las masas oscuras corticales. Imagen de elaboración propia.

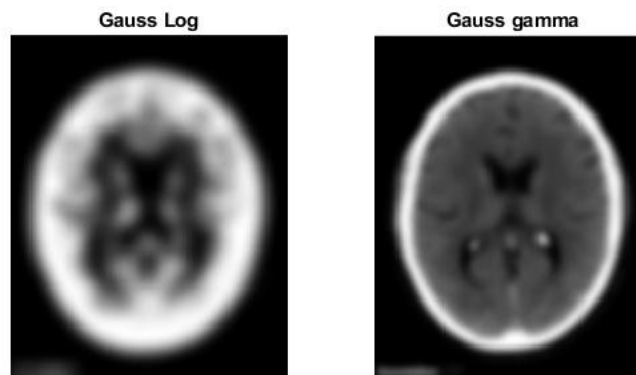


Figura 6. Imágenes resultantes tras aplicar el filtrado gaussiano. Izquierda: transformación logarítmica filtrada; derecha: corrección gamma filtrada. El filtro gaussiano suaviza las transiciones y reduce ruido antes de la detección de bordes. Imagen de elaboración propia.

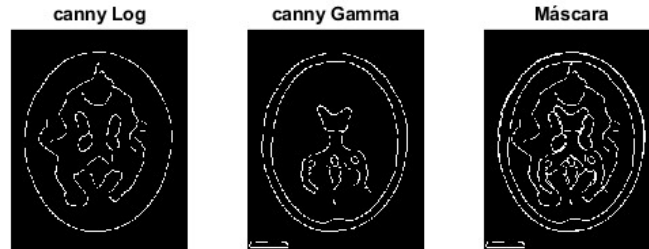


Figura 7. Máscaras obtenidas tras aplicar el filtro Canny. Izquierda: máscara para imagen logarítmica; centro: máscara para corrección gamma; derecha: máscara final obtenida al combinar ambas. Imagen de elaboración propia.



Figura 8. Imagen donde se superpone la máscara final con la imagen original del cerebro, mostrando la delimitación de estructuras principales. Imagen de elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

La combinación de corrección de contraste, filtrado gaussiano y detección de bordes con el algoritmo Canny permitió resaltar de manera efectiva los contornos y estructuras presentes en las imágenes médicas. Esta metodología ofrece un recurso complementario para mejorar la visualización, apoyar el diagnóstico por imagen y favorecer el análisis computacional en estudios clínicos.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. C. Gonzalez y R. E. Woods, Digital Image Processing, 4th ed., Pearson, 2018.
- [2] E. Cuevas, Procesamiento Digital de Imágenes Usando MATLAB y Simulink, Alfaomega, 2010.
- [3] Y. Zhang, X. Liu, y J. Shen, “Medical image enhancement and edge detection based on improved Canny operator and adaptive histogram equalization,” Biomedical Signal Processing and Control, vol. 80, p. 104283, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2022.104283>
- [4] F. Mahmoudi, M. Ghassemian, “Improved brain MRI segmentation using hybrid methods of contrast enhancement and morphological filtering,” Computers in Biology and Medicine, vol. 146, p. 105692, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2022.105692>
- [5] S. Roy, P. Ghosh, y A. K. Maity, “An efficient Gaussian-Canny hybrid approach for edge detection in medical imaging,” Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences, vol. 36, no. 4, pp. 1561–1572, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.07.023>
- [6] H. Li, et al., “Contrast enhancement for medical images using adaptive gamma correction with weighting distribution,” IEEE Access, vol. 8, pp. 27833–27845, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2967249>
- [7] Radiology Masterclass, CT Brain – Ventricles, disponible en: https://www.radiologymasterclass.co.uk/gallery/ct_brain/ct_brain_stacks/ventricles_ct_brain



Memorias 2025

ISBN: 978-970-96155-1-7

