

Rumbos Tecnológicos

Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Avellaneda
Publicación de la Secretaría de Ciencia, Tecnología y Posgrado
Volumen 15 - Octubre 2025 - ISSN: 1852-7701





Rumbos Tecnológicos

Publicación de la Secretaría de Ciencia, Tecnología y Posgrado

Rector de la Universidad Tecnológica Nacional
Ing. Rubén Soro

Dirección
Lic. Nora Dari

Decano Facultad Regional Avellaneda
Lic. Luis Garaventa

Comité Editorial
Dr. Jorge De Celis, Dra. Patricia Domench,
Dr. Omar Faure, Dra. Jorgelina Loza,
Dra. Ayelen Lutz, Dr. Francisco Spano

Vicedecano Facultad Regional Avellaneda
Director Editorial UTN Avellaneda
Ing. Víctor Barbuto

Coordinación gráfica
Hernán Lascano

Secretaría de Ciencia, Tecnología y Posgrado
Lic. Nora Dari

Volumen 15. Octubre de 2025

ISSN (versión en línea): 1852-7701

Propietarios: Facultad Regional Avellaneda
Ramón Franco 5050 (CP. B1874ABY) Villa
Domínico, Buenos Aires, Argentina

Toda información, opinión o juicio vertidos en los trabajos publicados en Rumbos Tecnológicos es responsabilidad de sus autores y no constituye toma de posición por parte de la Facultad Regional Avellaneda.

Se permite la reproducción parcial de los contenidos de esta publicación, citando debidamente a las fuentes.

Imagen de tapa diseñada por Freepik - www.freepik.es

INDICE

Artículos de Investigación científica y tecnológica

Iluminación led y manejo integrado del vector: implicancias técnicas para reducir el riesgo de dengue en áreas urbanas argentinas.....	15
<i>Autores:</i> Juan Carlos Pitman, Leonardo Melo	
La gestión de activos ferroviarios por RCM.....	35
<i>Autores:</i> Eugenio F. Dattilo, Jorge M. Bonnefon, Germán D. Zaupa, Nahuel Pomiro Nicolás Di Nardo y Rodrigo Samames.	
Integridad académica en tiempos de inteligencia artificial generativa: nuevas formas de autoría en espacios académicos	41
<i>Autora:</i> María Cristina Kanobel.	
Patrón de frecuencia basado en el control de un oscilador mediante mejoras de la medición adaptativa referenciada por GPS	59
<i>Autores:</i> Diego Adán Scharf, Marcelo Daniel Leo, Luis Napolitano.	
Actividades curriculares en entornos digitales: dictado bimodal de la asignatura Ingeniería y Sociedad en UTN	71
<i>Autores:</i> Karina Cecilia Ferrando, Julieta Rozenhauz, Nora Dari, Rafael Omar Cura, Olga Haydée Páez.	

Dossier Jornadas de Ingeniería Química Sustentable 2024

Sílices aminofuncionalizadas para la adsorción de CO ₂ : importancia del tratamiento post-síntesis	87
<i>Autores:</i> Guillermo D. Aquino, Cristian M. Piqueras, M. Sergio Moreno, Lucas L. Panizza, Germán P. Benedictto y Andrea M. Pereyra.	
Valorización de residuos de raíz de batata para la biosíntesis sustentable de alfa-amilasas bacterianas.....	93
<i>Autoras:</i> Debora Conde Molina, Guillermina Bogao y Graciela Corbino.	
Estrategias de encapsulación de principios activos usando almidón y alginato	99
<i>Leiza D. Fernández, Paula F. González Seligra, Lucía M. Famá.</i>	

Remoción de cinc en efluentes acuosos empleando diatomitas en proceso semicontinuo	105
<i>Autores:</i> Pablo S. Gauna, Sofía García Bado, Agustina Bentivoglio, Griselda L. Sosa, Helena M. Ceretti y Silvana A. Ramírez.	
Efecto del contenido de titanio en óxidos mixtos como fotocatalizadores de colorantes azoicos.....	111
<i>Autores:</i> Edward Peraza, Georgina Ortenzi, y Candelaria Leal Marchena.	
Uso de la <i>ulva lactuca</i> para el tratamiento sustentable de efluentes con níquel.....	117
<i>Autoras:</i> Miretti, Nina M; Torres Meza, Lucía; Ardanza, M. del Pilar; Piol, M. Natalia; Boeykens, Susana P.	
Modelo cinético para la acetilación homogénea de glicerol crudo empleando ácido acético	125
<i>Autores:</i> Federico M. Perez, Francisco Pompeo, Gerardo F. Santori y Martín N. Gatti.	
Estudio del estado trófico de los arroyos Sarandí y Santo Domingo	131
<i>Autores:</i> Tatiana D. Lazo, Laura B. Melitón, Cristina T. Spelitni, Gabriela F. Coppo y Jorge G. Machalec.	
Optimización heurística de las isotermas de adsorción utilizando algoritmos genéticos y simulated annealing.....	139
<i>Autores:</i> Jorge O. Pellegrini y Jorge P. de Celis.	

Avances Académicos

Apantallamiento magnético	147
<i>Autores:</i> Federico Hernan Saffioti, Rodrigo Vilte.	
Estudio de fallas de un eje reductor	159
<i>Autores:</i> Cataldo Agustin, Rivarola Micaias, Stein Hernán, Scuderi Luciano, Bidegaray Horacio.	

PRÓLOGO

La presentación de un nuevo volumen de Rumbos Tecnológicos es siempre motivo de satisfacción, evidenciando la vitalidad de una comunidad que persiste en la valoración de la ciencia y la tecnología como ejes fundamentales para el desarrollo y la optimización del entorno global.

Las revistas científicas son el principal medio para la difusión de los hallazgos de investigación. Estos dispositivos están sujetos a la revisión y validación de la comunidad científica, tanto a nivel territorial como internacional. Consecuentemente, su función trasciende la mera acreditación profesional; constituyen un circuito de conocimiento esencial que integra a los generadores y a los validadores del saber. Por ese motivo resaltamos su enorme importancia.

A pesar de los contextos actuales que procuran devaluar la contribución de los investigadores con el fin de desfinanciar el sistema científico-tecnológico, mantenemos la convicción inquebrantable de la necesidad imperativa de sostener la importancia del conocimiento científico tecnológico en la formulación de decisiones. Esto aplica transversalmente en el ámbito científico, las políticas institucionales y la praxis cotidiana, justificando nuestra dedicación a esta publicación y la promoción de la contribución activa de nuestro cuerpo docente-investigador.

Este número incorpora, además de los artículos científicos convencionales y los avances académicos, un dossier monográfico relativo a las Jornadas de Ingeniería Química Sustentable. Este evento, gestado en el seno del Departamento de Ingeniería Química, impulsa la comunicación de los progresos de docentes y estudiantes a la comunidad pertinente.

Finalmente, extiendo mi gratitud a todas las personas que confluyeron en la materialización de este volumen: investigadores e investigadoras, el estudiantado y el equipo editorial de Rumbos Tecnológicos. Su labor concertada refrenda el legado institucional de construcción y transferencia de conocimiento.

*Lic. Luis Garaventa
Decano*

INTRODUCCIÓN

En clave social llegar al número 15 de cualquier instancia es causal de celebración o festejo.

Este año nuestra Revista Rumbos Tecnológicos celebra sus 15 años de vida y sostenimiento, aun en entornos que parecerían no estar demasiado conformes con la posibilidad y necesidad de generar y difundir conocimientos nuevos o aplicar tecnologías diferenciadas.

Por este motivo, en términos de seguir pensando, investigando y difundiendo los saberes y conocimientos generados es que insistimos en este sostenimiento y arriesgamos nuevas experiencias que pongan en juego, saberes pero también posibilidades.

Por ello además de presentar los tradicionales ensayos y artículos vinculados con la investigación, sea esta básica o aplicada, en esta entrega se agregan dos secciones. Por una parte un Dossier de las Jornadas de Ingeniería Química Sustentable, con participación de investigadoras e investigadores de todo el país, y una denominada Avances Académicos que esperamos poder expandir para el próximo número, que tiene publicaciones que pasaron por una doble revisión de estudiantes que están haciendo sus primeros avances en investigación.

Este doble juego de participación en la publicación de referentes de sus campos temáticos y noveles nos permite pensar en el desarrollo de las capacidades de nuestra comunidad para generar nuevas miradas sobre la investigación, el desarrollo y la innovación. Una mirada que puede trascender el espacio institucional y reinsertarse en el contexto social de donde provienen quienes investigan y los propios problemas de quienes investigan.

Como dijimos en la versión 2024, nuestra Revista Rumbos Tecnológicos es una de las señales que damos para seguir con nuestras metas institucionales, ancladas en el sostenimiento de los preceptos que la UTN tiene desde su creación el año 1948: “la Universidad Obrera Nacional, como institución superior de Enseñanza Técnica, con el objeto de formar integralmente profesionales de origen laboral destinados a satisfacer las necesidades de la industria argentina”.

Celebramos entonces los 15 años de Rumbos Tecnológicos y los 70 de la Facultad Regional Avellaneda y para ello seguiremos poniendo en acción esta política de pensar que un futuro mejor es posible para quienes transitamos esta Facultad y para el entorno que interactúa con ella.

Como siempre gracias por estar acompañándonos.

*Lic. Nora Dari
Secretaría de Ciencia, Tecnología y Posgrado*

EDITORIAL

Nos complace presentar el Volumen N.º 15 de Rumbos Tecnológicos, una edición que reafirma el compromiso sostenido de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Avellaneda con la producción, difusión y puesta en valor del conocimiento científico-tecnológico, tanto en el ámbito académico como en su proyección social e industrial.

En este número convergen diversas líneas de investigación y experiencias académicas que abordan, desde múltiples enfoques, los desafíos contemporáneos de la ingeniería, la educación superior, la sostenibilidad y la innovación tecnológica.

El volumen se inaugura con un conjunto de artículos que reflejan una preocupación creciente en nuestras casas de estudio: el impacto de las tecnologías emergentes en los entornos educativos. En particular, el trabajo de la Dra. María Cristina Kanobel analiza con agudeza las transformaciones en las nociones de autoría e integridad académica ante el avance de la inteligencia artificial generativa, abriendo un espacio de debate imprescindible en tiempos de redefiniciones éticas y pedagógicas.

En esa misma línea, el equipo conformado por la Dra. Karina Ferrando y colegas explora las prácticas de enseñanza en contextos bimodales, una modalidad que ha llegado para quedarse y que exige nuevas estrategias para el diseño curricular. Asimismo, el estudio de Javier Carrizo sobre las necesidades discursivas en carreras de ingeniería aporta herramientas concretas para el fortalecimiento de la comunicación académica y profesional en nuestras aulas.

El volumen también incluye desarrollos tecnológicos con fuerte anclaje en la innovación aplicada. Desde el diseño de generadores eólicos de baja potencia mediante simulaciones avanzadas (Silvio Colombo y equipo), hasta mejoras en sistemas de oscilación. (Scharf, Leo y Napolitano), los artículos evidencian el potencial transformador de la ingeniería cuando se orienta hacia soluciones concretas.

Cabe destacar también los aportes vinculados al ámbito de la salud pública y el ambiente, como el estudio de Juan Carlos Pitman y Leonardo Melo sobre iluminación LED y control vectorial para la prevención del dengue, que ejemplifica el rol interdisciplinario de la tecnología en contextos urbanos.

Complementando este número, se integran los trabajos presentados en las XIV Jornadas de Ingeniería Química Sustentable, evento que se consolida como un espacio de referencia para la discusión de problemáticas ambientales y el desarrollo de tecnologías limpias. Los artículos aquí reunidos abordan temas como la valorización de residuos agroindustriales, la remoción de contaminantes en efluentes, el desarrollo de fotocatalizadores y adsorbentes avanzados, el uso de biomasa marina para tratamiento de metales pesados, y la modelización de procesos químicos orientados a la eficiencia y sustentabilidad.

Estos trabajos no sólo destacan por su rigor científico, sino también por su enfoque en la química verde, la economía circular y la ingeniería responsable, principios esenciales para una transición hacia modelos productivos más equitativos y resilientes.

El carácter federal de esta edición —con aportes de investigadores e investigadoras de diferentes Facultades Regionales de la UTN y de otras instituciones del sistema científico nacional, como la Universidad Nacional de General Sarmiento, la Universidad Nacional de La Plata, la UBA y el CONICET— enriquece el diálogo académico y fortalece el entramado colaborativo que impulsa la ciencia argentina.

Desde el comité editorial de Rumbos Tecnológicos, agradecemos profundamente a quienes con su esfuerzo, creatividad y compromiso han hecho posible esta nueva publicación. A las y los autores, por su valioso aporte; a los evaluadores, por su mirada crítica y constructiva; y a toda la comunidad académica, por sostener estos espacios de construcción colectiva del conocimiento.

Invitamos a recorrer estas páginas con la certeza de que la tecnología, cuando se construye con sentido ético y vocación social, es una herramienta poderosa para transformar la realidad y proyectar un futuro más justo, sostenible e inclusivo.

*Ing. Víctor Barbuto
Vicedecano / Coordinador editorial*

Artículos de Investigación científica y tecnológica

ILUMINACIÓN LED Y MANEJO INTEGRADO DEL VECTOR: IMPLICANCIAS TÉCNICAS PARA REDUCIR EL RIESGO DE DENGUE EN ÁREAS URBANAS ARGENTINAS

Juan Carlos Pitman^{1,2*} Leonardo Melo^{1,2}

¹ Universidad Tecnológica Nacional, Regional Avellaneda, Av. Ramón Franco 5050, 1874, Villa Domínico, provincia de Buenos Aires

² GECoR, Grupo de Energías Convencionales y Renovables

*Autor a quien se debe dirigir la correspondencia: jcpitman@fra.utn.edu.ar

RESUMEN

El incremento reciente de casos de dengue en Argentina coincide con la expansión masiva de iluminación LED en entornos urbanos y domésticos, lo que plantea interrogantes sobre su posible influencia en el comportamiento del Aedes aegypti. Este estudio revisa evidencia técnica y biológica para evaluar la relación entre características de las lámparas LED —temperatura de color, distribución espectral de potencia (SPD), iluminancia, índice de reproducción cromática (CRI) y diseño fotométrico— y la atracción o modulación de la actividad vectorial.

La fisiología visual del A. aegypti, con sensibilidad máxima en longitudes de onda cortas (UV–azul) y en verde (520 nm), sugiere que fuentes ricas en componentes UV/azul pueden incrementar su estimulación visual. La iluminación artificial nocturna (ALAN) no solo actúa como estímulo luminoso, sino como modulador circadiano, prolongando la actividad crepuscular hacia la noche y aumentando el tiempo potencial de contacto vector–humano.

Los resultados indican que LED cálidos (≤ 3000 K), SPD con bajo contenido UV/azul, control de iluminancia y ópticas con corte total reducen la atracción fuera de fase. Aunque la iluminación LED no es un determinante primario

ABSTRACT

The recent increase in dengue cases in Argentina coincides with the widespread expansion of LED lighting in urban and domestic environments, raising questions about its potential influence on the behaviour of Aedes aegypti. This study reviews technical and biological evidence to evaluate the relationship between LED lamp characteristics—correlated colour temperature (CCT), spectral power distribution (SPD), illuminance, colour rendering index (CRI) and photometric design—and the attraction to, or modulation of, vector activity.

The visual physiology of A. aegypti, with peak sensitivity at short wavelengths (UV–blue) and in the green (~520 nm), suggests that sources rich in UV/blue components may enhance visual stimulation. Artificial light at night (ALAN) functions not only as a luminous stimulus but also as a circadian modulator, extending crepuscular activity into the night and increasing the potential duration of vector–human contact.

The evidence indicates that warm LEDs (≤ 3000 K), SPDs with low UV/blue content, illuminance control and full cut-off optics reduce out-of-phase attraction. Although LED lighting is not a primary determinant of transmission, its optimisation represents a low-cost complementary

de transmisión, su optimización representa una medida complementaria de bajo costo para el manejo integrado del vector en contextos urbanos argentinos.

Palabras claves

Iluminación LED — Luz artificial nocturna (ALAN) — Aedes aegypti — Distribución espectral de potencia (SPD) — Manejo integrado del vector

measure for integrated vector management in Argentine urban settings.

Key words

LED lighting — Artificial light at night (ALAN)
— Aedes aegypti — Spectral power distribution
(SPD) — Integrated vector management

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Situación epidemiológica

El dengue es una enfermedad viral transmitida principalmente por el mosquito *Aedes aegypti*, un vector ampliamente distribuido en zonas tropicales y subtropicales. Pertenece a la familia Flaviviridae y cuenta con cuatro serotipos (DENV-1, DENV-2, DENV-3 y DENV-4), todos capaces de provocar enfermedad en humanos. La infección puede cursar de forma asintomática o manifestarse como un cuadro febril agudo autolimitado; en un subconjunto de casos progresiva dengue grave (antes denominado hemorrágico) con compromiso multiorgánico y riesgo de muerte. Por su amplia distribución, su acelerada expansión y el volumen de población expuesta, el dengue se considera hoy la arbovirosis de mayor impacto global, afectando a más de 100 países con una incidencia que se ha multiplicado en las últimas décadas.

En la última década, el dengue mostró una tendencia ascendente en la Región de las Américas, con picos históricos en 2023 y, especialmente, en 2024. La WHO informó que al 30 de abril de 2024 ya se habían superado los 7,6 millones de casos globales, con un aumento particularmente pronunciado en las Américas (superando el récord de 2023 hacia mediados de año) (World Health Organization, 2024). La PAHO calificó 2024 como la mayor epidemia registrada en la Región desde 1980, con más de 13 millones de casos notificados y una presión sostenida sobre los sistemas de salud (Pan American Health Organization, 2024). Esta intensificación reciente no es un fenómeno aislado sino la expresión de una dinámica eco-epidemiológica compleja, en la que confluyen variabilidad climática, cambios ambientales y urbanos, movilidad humana y retos persistentes en el control vectorial.

En Argentina, el *Aedes aegypti* se ha establecido en gran parte del territorio y ha expandido su distribución hacia regiones donde décadas atrás no tenía presencia estable. Factores como el aumento de temperaturas mínimas, la urbanización acelerada, la disponibilidad de criaderos artificiales (recipientes con agua limpia en ámbitos domésticos y peridomésticos) y las deficiencias en la gestión de residuos favorecen su proliferación. Este mosquito presenta hábitos preponderantemente domésticos y peridomésticos; su conducta hematofágica es principalmente diurna con picos de actividad al amanecer y al atardecer, pero puede adaptarse a variaciones ambientales y, en entornos urbanos, mostrar actividad en horarios nocturnos cuando existen estímulos favorables, como la luz artificial. En la temporada 2023–2024, el Ministerio de Salud reportó 583.297 casos y 419 fallecidos, el mayor impacto histórico nacional (Ministerio de Salud - República Argentina, 2024). En 2025, los casos regionales bajaron respecto de 2024, aunque siguieron por encima de promedios

quinquenales en varios países; además, se observó la introducción y circulación de DENV-3 en Argentina en 2024, con potencial impacto en la dinámica de transmisión y en el perfil de susceptibilidades poblacionales (Pan American Health Organization, 2025).

1.2 Biología del vector y luz

Más allá de las cifras epidemiológicas, las características biológicas y conductuales del Aedes aegypti así como su relación con la luz son un factor ambiental modulador a tener en cuenta, de acuerdo a investigaciones realizadas en los últimos años.

Desde el punto de vista sensorial y conductual, A. aegypti es un mosquito diurno/crepuscular que integra señales olfativas (CO_2 , compuestos de la piel humana) con claves visuales del entorno para orientar la búsqueda de hospedero. Evidencia reciente muestra que el sistema olfativo “abre” o modula preferencias visuales frente a estímulos de piel humana y del espectro visible, afinando respuestas de aproximación y picado en contextos específicos (Alonso San Alberto, y otros, 2022). De manera complementaria, se ha observado en condiciones controladas que la luz artificial nocturna (Artificial Light at Night, ALAN) puede incrementar la conducta de picado: bajo iluminación blanca tenue durante la noche, el A. aegypti aumenta la frecuencia de mordeduras, lo que sugiere que la iluminación actúa como modulador circadiano del comportamiento, extendiendo o desplazando ventanas de actividad (Rund, Labb, Benefiel, & Duffield, 2020). Este tipo de hallazgos no implica necesariamente que el A. aegypti sea atraído masivamente por la luz a la distancia —no es un lepidóptero nocturno fuertemente fototáctico—, pero sí que la iluminación puede alterar la arquitectura temporal de sus actividades.

1.3 Iluminación LED en entornos urbanos

En paralelo al empeoramiento epidemiológico observado en los últimos años, Argentina ha experimentado una rápida masificación de la tecnología LED tanto en alumbrado público como en usos domésticos y comerciales. El Plan de Alumbrado Eficiente (PLAE), impulsado por la Secretaría de Energía desde mediados de la década de 2010, estableció en 2022 un reglamento general para el recambio de luminarias públicas por tecnología LED, definiendo provincias y municipios beneficiarios y pautas de implementación. Este esfuerzo nacional se complementa con iniciativas locales de gran escala: en la Ciudad de Buenos Aires y su área metropolitana, Enel X junto a Edesur instaló miles de luminarias LED en zonas densamente pobladas, además de proyectos en Avellaneda, Ezeiza y plazas de Lanús con telegestión (Enel X, 2025); el municipio de Rosario lanzó el plan “Led 2025”, con cobertura total proyectada antes de 2027 y una inversión superior a los \$63.800 millones (Rosario Noticias, 2025); en Pergamino se concretó el reemplazo en múltiples barrios con mejoras de visibilidad y reducción de costos energéticos y de mantenimiento (Grupo La Provincia, 2025); en General Roca, el recambio por LED se destacó por los ahorros y la durabilidad frente a las lámparas de sodio (General Roca, 2024). A la vez, el mercado doméstico y comercial creció con fuerza: proyecciones señalan que el mercado argentino de iluminación LED alcanza USD 518,7 millones en 2025, con una tasa compuesta estimada del 8,1 % en los años siguientes; en América del Sur, el mercado llega a USD 1,91 mil millones en 2025 y podría trepar a USD 2,51 mil millones en 2030 (Bagekari, 2025) (Mordor Intelligence, 2025).

1.4 Hipótesis y objetivos del estudio

La coincidencia temporal entre la masificación de la iluminación LED y el aumento de casos de dengue en Argentina plantea un interrogante técnico y científico. La expansión de esta tecnología

implica mayor disponibilidad de luz artificial en horas crepusculares y nocturnas, lo que lleva a preguntarse si las características espectrales e intensitarias de las lámparas LED podrían modular —aunque de forma indirecta— la actividad del *Aedes aegypti* y, en consecuencia, influir en el riesgo de transmisión.

Los informes de la OMS y la OPS atribuyen el incremento reciente de casos principalmente a determinantes reconocidos: variabilidad climática, aumento de temperaturas y lluvias, urbanización, densidad poblacional, gestión deficiente de residuos, circulación de distintos serotipos y cobertura de control vectorial (World Health Organization, 2024) (Pan American Health Organization, 2024). Sin embargo, la evidencia fisiológica y conductual sugiere que la iluminación artificial nocturna puede alterar la “arquitectura temporal” del vector, extendiendo artificialmente los períodos crepusculares —momentos de máxima actividad— y aumentando el tiempo potencial de contacto vector–humano.

Estudios clásicos y recientes muestran que la luz funciona no solo como estímulo visual sino también como modulador circadiano (Taylor & Jones, 1969) (Briscoe & Chittka, 2011) (Alonso San Alberto, y otros, 2022). El *A. aegypti* presenta sensibilidad a longitudes de onda cortas (UV–azul) y verdes (530 nm), mientras que la luz fría (4000 – 6500 K) incrementa la estimulación de estos fotorreceptores en mayor medida que la luz cálida (< 3000 K). Además, cambios en el ciclo lumínico pueden modificar la fase y amplitud de la actividad, especialmente en climas urbanos cálidos (Rivas, y otros, 2018) (Lima-Camara, 2009) (Rund, Labb, Benefiel, & Duffield, 2020).

Con base en ello, este trabajo se propone:

1. Contrastar tendencias epidemiológicas y condicionantes ambientales con mecanismos biológicos plausibles, evitando atribuciones causales espurias.
2. Revisar la literatura sobre visión de insectos, cronobiología y respuestas conductuales bajo distintas condiciones de iluminación, enfocándose en parámetros técnicos como temperatura de color, distribución espectral, iluminancia, CRI y diseño fotométrico.
3. Derivar recomendaciones para la selección e instalación de lámparas LED en vía pública y entornos domésticos que minimicen la extensión artificial de la actividad del vector, sin comprometer la eficiencia energética, la seguridad vial ni la calidad visual.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

La presente revisión se estructuró como revisión narrativa destinada a integrar evidencia interdisciplinaria sobre la relación entre iluminación LED y la conducta del *Aedes aegypti*, con foco en implicancias técnico-operativas para contextos urbanos.

Se cubrió la ventana 2010 – 2025 en español, inglés y portugués, consultando grupos de fuentes internacionales y regionales (bases bibliográficas indexadas y repositorios científicos) y documentos técnicos de organismos de referencia en salud y luminotecnia, sin enumeración exhaustiva. La estrategia combinó descriptores entomológicos y fotométricos con operadores booleanos; a modo de ejemplo sintético: (“*Aedes aegypti*” AND (LED OR “artificial light at night” OR ALAN) AND (spectral OR wavelength OR CCT OR SPD OR illuminance) AND (phototaxis OR activity OR biting)).

Las referencias recuperadas se gestionaron con eliminación de duplicados, cribado por título/resumen y lectura a texto completo. Criterios de inclusión: estudios empíricos o revisiones con datos sobre respuesta de mosquitos a variables de iluminación y/o cronobiología aplicable al *A. aegypti*; reporte suficiente de parámetros técnicos (CCT, SPD/longitudes de onda, iluminancia en

el plano de interés, CRI, geometría/fotometría de instalación) y contexto experimental/ambiental; aplicabilidad al ámbito urbano/doméstico.

En lo referido a los criterios de exclusión se hizo especial hincapié en trabajos sin diferenciación de especie o sin datos verificables; escenarios no extrapolables al medio urbano; ausencia de parámetros lumínicos comparables; material no arbitrado salvo informes técnicos de referencia.

El análisis se organizó en dos fases: (i) normalización/estandarización de variables técnicas y ambientales (p. ej., clasificaciones de CCT, bandas espectrales, rangos de lux, altura de evaluación 0,5 – 1,5 m, CRI, distribución fotométrica, y condiciones de temperatura/humedad), y (ii) correlación cualitativa y cuantitativa entre dichas variables y la respuesta del vector (atracción / actividad / oviposición / picado), priorizando magnitudes de efecto y consistencia entre estudios; en presencia de resultados discordantes, se aplicó análisis de sensibilidad considerando calidad metodológica, diferencias de SPD a igual CCT y microcontexto ambiental urbano.

Con respecto a las limitaciones observadas, se pueden enumerar: heterogeneidad de diseños, posible sesgo de publicación y el carácter de revisión narrativa (no PRISMA), que impiden metaanálisis formal, pero permiten extraer patrones robustos para derivar recomendaciones técnicas reproducibles.

3. RESULTADOS

3.1 Relación entre espectro luminoso y atracción/actividad del *Aedes aegypti*

Sensibilidad espectral y atracción lumínica

El *Aedes aegypti* posee visión adaptada a rangos UV y visible de longitud de onda corta-media, con picos en 350 nm y 520 nm, y mínima sensibilidad hacia el rojo (Wilson, Wakefield, Roberts, & Jones, 2021). Por ello, fuentes con alto contenido UV–azul son más visibles y atractivas que aquellas dominadas por longitudes de onda largas. Las lámparas incandescentes emiten más rojo/IR, las CFL presentan picos definidos (incluyendo UV) y las LED blancas carecen casi totalmente de UV, concentrando energía en un pico azul (450 nm) y parte del visible (véase Figura 1). Esto explica por qué, en general, las LED blancas atraen menos insectos que incandescentes o fluorescentes, aunque LEDs monocromáticos UV, azules o verdes pueden ser más eficaces para capturas. Experimentos con trampas lumínicas confirman mayor atracción con longitudes cortas que con largas (Panthawong, y otros, 2021).

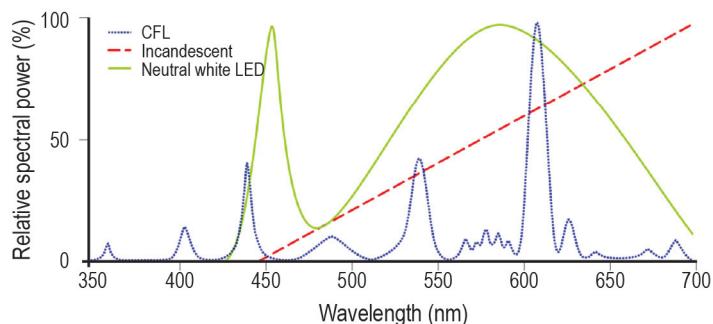


Figura 1. Distribución espectral típica de tres fuentes de luz doméstica: CFL (línea azul punteada), incandescente (línea roja punteada) y LED blanco neutro (línea verde continua). Fuente: (Wilson, Wakefield, Roberts, & Jones, 2021)

En un bosque tropical, la luz UV atrajo más mosquitos (principalmente nocturnos), seguida por azul (470 nm) y verde (520 nm); el rojo produjo capturas muy bajas. En laboratorio, (Salles, Corrêa, Guimarães-Ribeiro, Carvalho, & Moreira, 2021) diseñaron una trampa tricromática (azul, verde, amarillo) que capturó casi el 100 % de hembras de *A. aegypti*, muy por encima de una trampa UV tradicional (25 %). Un LED verde puro también tuvo alta eficacia (91 %), coherente con su pico de sensibilidad. La preferencia entre azul y verde varía según la intensidad relativa percibida por el insecto: en varios dípteros, el azul es más atractivo a igual intensidad, pero incrementos de intensidad en verde pueden igualarlo o superarlo. El *A. aegypti* muestra fototaxis positiva entre UV y verde, siendo poco sensible a la luz roja pura, aunque objetos rojos o negros puedan atraerlo por contraste. Una iluminación doméstica de baja atracción sería rica en rojo y tenue, aunque con pobre reproducción cromática. En la práctica, las LED blancas varían en composición: las frías (4000 – 6500 K) tienen más azul; las cálidas (< 3000 K), más rojo. Los resultados sobre cuál atrae menos mosquitos son dispares, pero coinciden en que reducir o filtrar UV–azul es una estrategia prometedora. Por el contrario, para maximizar capturas se recomiendan LEDs de onda corta y alta intensidad.

Efectos del espectro en ritmos circadianos y conducta de picado

El *A. aegypti* es diurno/crepuscular, con picos de actividad al inicio de la mañana y a la tarde. En el noroeste argentino, el 81 % de la oviposición diaria ocurrió entre las 16:00 y 20:00 h, coincidiendo con el crepúsculo (Estallo, y otros, 2011). La caída de la luz solar actúa como estímulo temporal para conductas clave, mientras que la actividad nocturna es mínima (Rund, Labb, Benefiel, & Duffield, 2020) (Kawada, Takemura, Arikawa, & Takagi, 2005).

La luz artificial nocturna (ALAN) puede alterar este patrón. Rund y otros mostraron que una iluminación de 50 lux en plena noche incrementa notablemente la alimentación sanguínea fuera del horario habitual. En el *A. aegypti*, la presencia de luz nocturna contradice su “reloj” interno, prolongando la actividad más allá del ocaso. Otros vectores diurnos muestran efectos similares, mientras que especies nocturnas como *Anopheles* reducen su actividad bajo luz intensa (Baik, y otros, 2020).

Evidencias adicionales señalan que la ALAN puede modificar la estacionalidad: en el mosquito *Aedes albopictus*, reduce la diapausa invernal en un 40 % (Westby & Medley, 2020); en el *Culex pipiens*, extiende la actividad hacia fines de otoño en zonas urbanas iluminadas. Aunque la OMS aún no reconoce la iluminación artificial como factor de riesgo (Richter-Boix, 2022), los datos sugieren que podría ampliar la ventana de contacto vector–humano. En entornos urbanos, reducir la emisión UV–azul mediante luces cálidas o filtros especializados podría mitigar la atracción y actividad del *A. aegypti* en horarios críticos, contribuyendo a disminuir el riesgo de transmisión en zonas endémicas (Coetzee, y otros, 2022).

3.2 Influencia de la temperatura de color

La temperatura de color correlacionada (CCT, por sus siglas en inglés), expresada en Kelvin (K), describe la apariencia cromática de una fuente de luz blanca. Valores bajos (≤ 3000 K) generan una tonalidad cálida, con predominio de longitudes de onda largas (rojo–ámbar) y menor contenido en azul, mientras que valores altos (≥ 5000 K) producen luz fría, Enriquecida en longitudes de onda cortas (azul–violeta). Desde el punto de vista fotobiológico, este parámetro es un descriptor indirecto de la distribución espectral de potencia (SPD) de la lámpara, la cual es determinante en la percepción visual del *Aedes aegypti*.

Relación entre CCT, espectro y atracción de insectos

Estudios de revisión técnica (Lighting Global, 2018) indican que los LED de alto CCT presentan un pico de emisión más intenso en la región azul (alrededor de los 450 nm), rango al que *Aedes aegypti* y otros dípteros muestran elevada sensibilidad. Por el contrario, los LED cálidos desplazan su espectro hacia el rojo-ámbar, reduciendo drásticamente la irradiancia en la franja azul y, en teoría, disminuyendo la estimulación de los fotorreceptores sensibles a longitudes de onda cortas. Sin embargo, el CCT nominal no siempre predice con precisión la atracción de insectos: dos lámparas con igual temperatura de color pueden diferir en la forma y amplitud de su SPD. Esto implica que la evaluación debe basarse en mediciones espectrales directas y no exclusivamente en el valor en Kelvin.

Evidencia experimental comparativa

En experimentos de campo realizados por Wakefield y otros (Wakefield, Broyles, Stone, Jones, & Harris, 2016), se comparó la atracción de insectos voladores hacia LED blancos cálidos (~3000 K) y fríos (~6500 K) de igual intensidad. Los resultados mostraron una reducción significativa en capturas con LED cálidos, atribuible a su menor contenido azul. Aunque la muestra incluyó principalmente lepidópteros y coleópteros, el patrón concuerda con la fisiología visual del *Aedes aegypti*. En contextos tropicales, Oriyomi & Babalola (2020) encontraron que longitudes de onda ricas en azul y verde producían mayores capturas de mosquitos, mientras que las fuentes con predominio de rojo o ámbar eran menos efectivas (Oriyomi & Babalola, 2020).

En estudios con especies afines, como *Aedes albopictus*, se observó que la atracción decrece al disminuir el contenido de azul en el espectro, reforzando la hipótesis de que la luz fría aumenta el riesgo de interacción vector-humano en horas nocturnas o crepusculares.

Fundamento fisiológico y comportamiento

La retina compuesta del *Aedes aegypti* presenta dos picos principales de sensibilidad espectral: uno en la región UV (~350 nm) y otro en el verde (~520 nm), con una respuesta secundaria en azul (Shimoda & Honda, 2013). Aunque la CCT no altera la sensibilidad intrínseca del insecto, sí modula la disponibilidad de fotones en las bandas más atractivas. Desde la cronobiología, la luz fría de alto CCT, rica en azul, es más eficaz para activar el reloj circadiano y, potencialmente, prolongar la actividad locomotora y de picado en condiciones nocturnas (Bruno, Farnesi, & Araripe, 2020). Por ello, una iluminación pública o doméstica predominantemente fría podría ampliar las ventanas temporales de actividad, especialmente en entornos urbanos con elevada contaminación lumínica.

Aplicaciones y recomendaciones preliminares

La evidencia técnica y experimental sugiere que:

- LED cálidos (≤ 3000 K) reducen la proporción de longitudes de onda cortas, lo que puede disminuir la atracción del *Aedes aegypti* en comparación con LED fríos, aunque no la elimina por completo.
- La SPD real de la lámpara debe evaluarse junto al CCT para establecer su potencial de atracción.
- El cambio a CCT bajos podría ser una medida de mitigación de riesgo entomológico de bajo costo en entornos domésticos y urbanos, especialmente cuando se combina con control de intensidad y orientación lumínica.

- La investigación futura debería cuantificar experimentalmente la respuesta del *Aedes aegypti* a diferentes CCT bajo condiciones controladas y de campo, considerando simultáneamente intensidad, polarización y contexto ambiental.

Tabla 1. Comparación de estudios sobre la influencia de la temperatura de color (CCT) en la atracción de insectos, con énfasis en evidencias aplicables al *Aedes aegypti*.

Referencia	Especie principal / Contexto	Comparación CCT	Hallazgos clave
Lighting Global (2018)	Insectos voladores variados / Revisión técnica	LED cálido (~2700K) vs LED frío (>5000K)	LED cálidos reducen contenido azul; posible menor atracción, evidencia no concluyente
Wakefield et al. (2021)	Insectos en entorno doméstico y exterior / Reino Unido	LED cálido (~3000K) vs LED frío (~6500K)	LED cálidos capturan menos insectos que fríos a igual intensidad
Oriyomi & Babalola (2020)	Mosquitos (predominio <i>Culex</i>) / Nigeria	LED cálido vs fuentes monocrómáticas y frías	Mayor atracción con longitudes de onda cortas; menor con rojo/ámbar
Shimoda & Honda (2013)	Varios insectos / Revisión entomológica	Ánálisis espectral y atracción en función de SPD	Contenido azul correlaciona con atracción; necesidad de evaluar SPD real
Estudio cronobiología Ae. aegypti (2023)	Ae. aegypti / laboratorio y campo	CCT y luz fría/azul como moduladores circadianos	Luz fría/azul prolonga actividad nocturna y de picado en Ae. aegypti

3.3 Efecto de la intensidad lumínica en la atracción y conducta del *Aedes aegypti*

La intensidad lumínica influye de forma no lineal en la fototaxis y el comportamiento del *Aedes aegypti*. Esta especie diurna requiere un nivel mínimo de iluminación para activarse: en oscuridad total (0 lux) por la noche prácticamente no vuela ni busca hospedero. Presenta un umbral muy bajo (<0,1 lux) para iniciar actividad, mucho menor que el de *A. albopictus* (> 10 lux), lo que indica adaptación a entornos más oscuros. Por encima del umbral, la actividad aumenta con la intensidad hasta cierto punto, reflejando fototaxis positiva; sin embargo, en niveles elevados la respuesta se satura o invierte, mostrando fototaxis negativa. Ensayos de elección revelan preferencia por zonas de menor iluminación (0 o 15 lux) frente a áreas más brillantes (150 – 1500 lux) y mayor propensión a picar en sombra que bajo luz directa (Liu, y otros, 2022). Incluso mosquitos diurnos como el *A. aegypti* evitan la luz intensa, favoreciendo entornos tenues semejantes a sus hábitats naturales de reposo.

En entornos artificiales, niveles modestos de luz nocturna alteran el ritmo circadiano del *A. aegypti*. Rund y otros comprobaron que 50 lux durante la noche —equivalente a un ambiente doméstico iluminado— elevó la alimentación sanguínea del 29 % (oscuridad) al 59 %, similar a niveles diurnos (82 %). Esto coincide con observaciones en zonas urbanas tropicales, donde la ALAN (artificial light at night) acorta el reposo nocturno, prolonga la ventana de actividad y aumenta el riesgo de transmisión. Su carácter antropofílico y peridoméstico lo expone a luz eléctrica de forma rutinaria, y la adopción masiva de LED podría favorecer actividad nocturna inusual.

El espectro también modula la respuesta: aunque su visión abarca desde UV (345 nm) hasta verde (650 nm) (Hug, Hugo, & Verhulst, 2024), con picos en amarillo-verdoso, el *A. aegypti* puede sentirse atraído por rojo, azul o violeta en contextos específicos, como la oviposición. La temperatura de color influye de manera divergente en distintas especies: la luz UV (común en espectros fríos) suprime la actividad de mosquitos nocturnos (*Anopheles gambiae*), mientras la luz cálida estimula al *A. aegypti*. Ajustar el espectro de lámparas LED, reduciendo azul-UV, podría mitigar atracción, aunque la relación espectro–intensidad en esta especie requiere más investigación. Su sensibilidad a bajas intensidades le permite activarse con poca luz, pero intensidades altas pueden provocar evasión.

Por tanto, la relación entre intensidad lumínica y fototaxis en el *A. aegypti* es cuasi-umbral y saturable: umbral bajo para activarse, aumento de actividad en niveles moderados y aversión en intensidades elevadas. La ALAN puede extender la agresividad más allá del crepúsculo, mientras que la oscuridad diurna la inhibe. En contextos urbanos latinoamericanos con alta cobertura LED, incluso brillos difusos (alrededor de 4 lux de skyglow) podrían estar modificando su comportamiento nocturno. Comprender esta dinámica es clave para evaluar el riesgo entomológico y diseñar estrategias lumínicas que limiten la actividad vectorial.

3.4 Influencia de parámetros técnicos de lámparas LED en la atracción del *Aedes aegypti* (fototaxis y comportamiento)

La atracción de insectos hacia fuentes de luz depende de parámetros espectrales y operativos clave. En lámparas LED para alumbrado vial o urbano, destacan: índice de reproducción cromática (CRI), parpadeo o modulación (flicker), distribuciónpectral de potencia (SPD) y ángulo de emisión/distribución fotométrica.

CRI – Cuantifica la fidelidad cromática y está ligado a la amplitud espectral. Fuentes de bajo CRI, como las de sodio de alta presión (monocromáticas, CRI < 30), suelen atraer menos insectos que las de espectro amplio. En un estudio, trampas LED blancas capturaron 48 % más insectos que trampas con sodio, por su mayor componente azul invisible para humanos pero visible para insectos (Pawson & Bader, 2014). El *A. aegypti* presenta sensibilidad a 350 nm (UV) y 500 – 550 nm (verde-azulado) (Hu, Whaley, Stein, Mitchell, & O'Tousa, 2011), por lo que un espectro rico en estas bandas podría aumentar su atracción. No obstante, Wakefield y otros (2016) no hallaron diferencias significativas entre LED fríos y cálidos si ambos carecen de UV. Estudios recientes muestran que eliminar azul/UV reduce capturas: LEDs ámbar (2000 K) atrajeron un 33 % de los insectos comparado con LEDs blancos 4000 K equivalentes (Dietenberger, y otros, 2024).

Flicker (PWM) – La modulación por ancho de pulso puede generar parpadeo. Aunque poco estudiado en *A. aegypti*, se ha visto que luz UV pulsada puede aumentar capturas en otras especies, hasta un 250 % más que luz continua (Liu, Liu, Chen, Ma, & Lee, 2017). El efecto depende de la frecuencia y del insecto; a baja frecuencia, el flicker podría alterar la actividad crepuscular o extender periodos activos. En iluminación exterior, se recomienda evitar flicker perceptible por posibles efectos en fauna nocturna.

SPD – Lámparas con igual temperatura de color pueden diferir en su SPD, variando la energía en longitudes clave. Un LED fosfórico típico presenta un pico en 450 nm y escasa emisión < 420 nm, mientras que un LED enriquecido con chip violeta puede emitir en UV cercano. Incluso pequeñas diferencias pueden afectar la atracción: filtrar < 500 nm en LEDs cálidos redujo capturas en más de 50 % (Dietenberger y otros, 2024). Rund y otros (2020) evidenciaron que la luz blanca

nocturna prolonga la actividad y las picaduras, por lo que la composición espectral de la ALAN puede ser relevante.

Distribución fotométrica – Ópticas direccionales y luminarias “full-cutoff” limitan la emisión hacia el horizonte y reducen la visibilidad desde largas distancias. En ensayos, luminarias con corte óptico capturaron niveles de insectos similares a zonas en oscuridad (Dietenberger y otros., 2024). Menos dispersión lateral implica un radio de atracción menor, reduciendo el contacto vector–humano.

Entonces, optimizar el CRI, minimizar flicker perceptible, ajustar la SPD y controlar la distribución fotométrica son estrategias viables para disminuir la interacción del *A. aegypti* con luminarias LED. En contextos urbanos argentinos, estas medidas pueden reducir la actividad vectorial asociada a la iluminación sin comprometer eficiencia energética ni seguridad pública.

3.5 Variables ambientales moduladoras

En sistemas de iluminación LED fijos y permanentes, las condiciones ambientales no pueden modificarse mediante el diseño de la lámpara, pero sí determinan el contexto en el que la luz influirá sobre *Aedes aegypti*. Entre ellas, la temperatura media y la humedad relativa son las más relevantes, ya que condicionan la abundancia y actividad del vector. Estudios climatológicos y entomológicos en Argentina indican que el *A. aegypti* mantiene actividad significativa en ambientes con temperaturas medias $\geq 20^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa superior al 60 %, condiciones que se presentan durante la mayor parte del año en el Noreste y Noroeste del país (Servicio Meteorológico Nacional, 2023) (Ministerio de Salud de la Nación, 2024).

En regiones de clima cálido-húmedo como el NEA y NOA, donde las condiciones favorables se extienden gran parte del año, las características técnicas de la luz —como el espectro, la temperatura de color, el CRI, la distribución espectral de potencia o la direccionalidad— adquieren mayor relevancia para minimizar la atracción. En zonas de clima templado, donde la presencia del vector se concentra en primavera-verano, la influencia de la luz artificial sobre su comportamiento será estacional; el mismo diseño lumínico tendrá relevancia principalmente en esos meses. En regiones áridas o frías, donde la actividad del *A. aegypti* es reducida o estacional muy breve, el criterio entomológico puede considerarse secundario frente a otros parámetros de diseño (eficiencia energética, confort visual, etc.).

La selección de lámparas LED debe considerar que el impacto de sus características técnicas sobre la atracción de mosquitos será tanto más relevante cuanto mayor sea la densidad y persistencia del vector en la zona, lo cual está directamente ligado al régimen climático local.

4. DISCUSIÓN

4.1 Interpretación de los resultados

Patrones consistentes

En conjunto, los apartados 3.1–3.5 muestran tres regularidades técnicas y biológicas con alta coherencia interna:

4. Mayor visibilidad/estimulación con longitudes de onda cortas (UV–azul–verde). La fisiología visual del *Aedes aegypti* (picos de sensibilidad en torno a 350 nm y 520 nm) explica por qué componentes UV–azules y parte del verde vuelven a las fuentes más “visibles” para el vector, mientras que el rojo puro resulta poco eficaz para estimularlo.

De allí que, a igualdad de condiciones, espectros enriquecidos en UV/azul tiendan a asociarse con más actividad o atracción relativa que aquellos dominados por longitudes de onda largas (rojo/ámbar) .

5. La iluminación artificial nocturna (ALAN) prolonga ventanas de actividad/picado. Aun sin que el *A. aegypti* sea un insecto fuertemente fototáctico a distancia, la presencia de luz nocturna moderada puede “desinhibir” su conducta de picadura fuera de horarios típicos, extendiendo la actividad crepuscular hacia la noche y aumentando el tiempo de contacto potencial con personas (p. ej., 50 lux en condiciones controladas).
6. Los LED “cálidos” suelen ser menos atractivos que los “fríos”, pero el CCT por sí solo no alcanza. Comparaciones de campo indican reducciones de capturas con LED cálidos (2700 – 3000 K) frente a fríos (4000 – 6500 K) a igual iluminancia, en línea con su menor contenido azul; sin embargo, el CCT es un descriptor imperfecto: lámparas con igual CCT pueden exhibir SPD (distribución espectral) diferentes, de modo que la fracción real de energía en bandas cortas es la que termina modulando la respuesta del vector.

Diferencias entre estudios y posibles explicaciones

- “Cálido vs. frío”: magnitud del efecto y especies objetivo. Algunos ensayos con comunidades de insectos (predominio de nocturnos) hallan diferencias marcadas entre LED cálidos y fríos; otros, cuando comparan luces “blancas” sin UV a igual iluminancia, reportan efectos pequeños o no significativos. Dos explicaciones técnicas plausibles son: (i) SPD no equivalente pese a CCT parecido (picos azules distintos), y (ii) composición de especies muestreadas (vectores nocturnos muy fototácticos vs. *Aedes* diurnos). En nuestro corpus, el patrón de menor atracción con espectros pobres en azul se mantiene como hipótesis conservadora para el *A. aegypti*.
- Intensidad: respuesta no lineal (umbral–saturación). Los resultados integrados sugieren que el *A. aegypti* muestra un umbral bajo de activación luminosa nocturna y que, a partir de cierto punto, intensidades altas dejan de sumar atracción e, incluso, inducen evitación. Esto concilia hallazgos de ALAN (luz tenue nocturna → más picado) con observaciones de fotofobia relativa bajo luces intensas. El comportamiento depende así de nivel de lux en el plano del insecto y del espectro que provee esos lux (p. ej., azul más eficaz para “gating” circadiano).
- Contexto circadiano y sincronizadores. La convergencia entre cronobiología (*zeitgeber* luz/oscuridad), actividad crepuscular natural (en Argentina, picos vespertinos bien documentados) y el “enmascaramiento” que produce la luz eléctrica nocturna explica por qué el problema no es tanto “atraer desde lejos” sino prolongar el período del día en el que el vector está operativo (más minutos de posible contacto vector–humano).
- Geometría/fotometría e “invisibilización” fuera del área útil. Estudios de alumbrado vial con ópticas dirigidas y apantallamiento muestran que reducir emisiones laterales y hacia el cielo disminuye drásticamente la llegada de insectos al entorno de la luminaria—even con la misma iluminancia en calzada—, porque disminuye el radio de visibilidad para la fauna voladora. Esto es un factor de diseño (no biológico) con impacto claro y reproducible.

Recomendaciones derivadas para la selección técnica de LED en Argentina

7. **Priorizar espectros con baja energía en bandas cortas** (poca o nula emisión < 500 nm), sea mediante LED cálidos (≤ 3000 K) o, mejor aún, SPD filtradas/ámbar cuando el proyecto y la normativa lo permitan. El uso de SPD “recortadas” en azul/UV es más determinante que el CCT nominal por sí solo.
8. **Controlar la iluminancia efectiva en el plano 0,5–1,5 m** (altura de vuelo típica), evitando excedentes nocturnos que puedan gatillar actividad fuera de fase. Donde sea viable, integrar dimming programado para reducir niveles tras el pico de uso humano—con cautela para no comprometer seguridad ni accesibilidad—dado el efecto de ALAN sobre conducta de picado.
9. **Diseño fotométrico con corte total y apantallamiento:** ópticas que dirijan la luz solo al área objetivo (calzada/vereda) y minimicen la emisión lateral-horizontal reducen la “señal” detectable por los insectos fuera del área iluminada. Esta medida es altamente costo-efectiva y compatible con metas de eficiencia y cielo oscuro.
10. **Atención a las condiciones ambientales locales.** En NEA/NOA (actividad del vector más prolongada durante el año), el “perfil entomológico” del alumbrado pesa más en la decisión técnica; en climas templados, su relevancia se concentra en primavera-verano. Por lo tanto, mismo diseño lumínico, distinto impacto relativo según zona climática y estacionalidad reportadas por SMN/MSal.
11. **CRI y otros parámetros.** Un CRI alto puede correlacionar con espectros más amplios (a menudo con mayor fracción azul); cuando el objetivo sanitario sea prioritario (plazas, áreas peridomiciliarias), conviene balancear CRI y SPD, privilegiando configuraciones con azul reducido siempre que los requisitos de percepción cromática lo permitan. En todos los casos, la SPD declarada/medida debe primar sobre el CCT en la evaluación del riesgo entomológico.

Implicancias biológicas y técnicas

La evidencia compilada sugiere que la iluminación LED no “causa” por sí misma los brotes de dengue —dominados por determinantes climáticos, ecológicos y sanitarios—, pero sí puede modular marginalmente la ventana temporal de exposición al favorecer actividad fuera de la oscuridad estricta. En un marco de gestión integrada, elegir SPD pobres en azul/UV, limitar iluminancia efectiva y diseñar fotometría con corte son acciones alineadas con: (i) salud pública (menor tiempo de actividad potencial), (ii) eficiencia energética (luz solo donde y cuando hace falta) y (iii) calidad ambiental (menos contaminación lumínica). Para el contexto urbano argentino—con fuerte despliegue de LED en vía pública y uso doméstico—estas medidas constituyen buenas prácticas de selección e instalación, técnica y epidemiológicamente justificables a la luz de los resultados de 3.1–3.5.

4.2 Relevancia para la salud pública

Los resultados integrados en el apartado 4.1 tienen implicancias directas para las estrategias de prevención del dengue en entornos urbanos y domésticos de la República Argentina. Aunque la iluminación artificial —y en particular la tecnología LED— no constituye un determinante primario de la transmisión, sí puede actuar como factor modulador al alterar los patrones temporales de actividad del *Aedes aegypti*. Esta modulación, aun si es de magnitud moderada, adquiere relevancia epidemiológica en contextos de alta densidad vectorial y circulación viral sostenida.

Extensión artificial de la ventana de actividad vectorial

En condiciones naturales, el A. aegypti concentra su actividad hematófágica y de oviposición en dos picos crepusculares bien definidos (Estallo et al., 2011; Lima-Camara, 2009). La introducción de luz artificial nocturna con componentes espectrales y niveles de iluminancia estimulantes para el vector puede prolongar estos picos hacia la noche, aumentando la superposición temporal entre la actividad del mosquito y la presencia de personas en el espacio público o en el peridomicilio (Rund, Labb, Benefiel, & Duffield, 2020). Este aumento del tiempo de contacto potencial incrementa la probabilidad de transmisión, particularmente en barrios y ciudades con circulación viral activa.

Sinergia con otros determinantes epidemiológicos

En zonas cálido-húmedas del NEA y NOA, donde las condiciones climáticas permiten actividad vectorial durante gran parte del año (Servicio Meteorológico Nacional, 2023), la influencia de la iluminación artificial sobre la conducta del vector puede tener un efecto acumulativo relevante. Este efecto es mayor cuando coexiste con:

- Alta densidad poblacional y proximidad entre viviendas.
- Deficiencias en el control de criaderos, que mantienen poblaciones adultas activas.
- Eventos epidémicos con transmisión intradomiciliaria y peridomiciliaria intensa (Ministerio de Salud, 2024; Pan American Health Organization, 2024).

En estos escenarios, la reducción de la atracción y actividad vectorial nocturna mediante criterios lumínicos apropiados se convierte en una medida de prevención complementaria.

Potencial de intervención a bajo costo

A diferencia de otras estrategias de control vectorial, la optimización de la iluminación no requiere intervenciones continuas sobre el vector ni depende de la participación sostenida de la comunidad en el manejo de criaderos. Medidas como:

- Seleccionar SPD con baja emisión en UV y azul.
- Mantener iluminancias en niveles funcionales mínimos.
- Emplear diseño fotométrico con corte total para evitar emisión lateral.

pueden implementarse en los programas de recambio y mantenimiento de alumbrado con costos marginales reducidos respecto del presupuesto global de iluminación, y con beneficios colaterales como reducción de contaminación lumínica y ahorro energético (Dietenberger et al., 2024).

Integración en políticas de salud urbana

La evidencia sugiere que los organismos responsables de salud pública y planificación urbana deberían considerar la iluminación como variable ambiental en el manejo integrado de vectores. Esto implica:

- Incorporar criterios entomológicos en los pliegos técnicos de licitaciones para alumbrado público.
- Coordinar entre áreas de obras públicas y programas de control vectorial.
- Promover el uso de configuraciones lumínicas menos atractivas en zonas de alta endemidad.

Si bien las intervenciones lumínicas no sustituyen las medidas tradicionales (eliminación de criaderos, control químico, vigilancia epidemiológica), su valor agregado radica en reducir el riesgo residual cuando otras medidas no logran interrumpir completamente la transmisión.

En síntesis, la iluminación LED, según sus características técnicas y su disposición espacial, puede desempeñar un papel secundario pero no despreciable en la dinámica de transmisión del dengue. Considerar este factor en las políticas de alumbrado urbano y doméstico permite sumar una capa de prevención que, integrada a las estrategias existentes, puede contribuir a disminuir la incidencia de la enfermedad. La optimización lumínica no resolverá el problema por sí sola, pero sí puede acortar la ventana de exposición humana al vector, especialmente en contextos urbanos densos y con actividad vectorial casi todo el año.

4.3 Recomendaciones técnicas

A partir de la evidencia experimental (apartados 3.1 a 3.5) y su interpretación 4.1 y 4.2), se proponen las siguientes recomendaciones para la selección, instalación y operación de luminarias LED en entornos urbanos y domésticos de la República Argentina, orientadas a minimizar la atracción o prolongación de actividad del *Aedes aegypti* sin comprometer los objetivos de eficiencia, seguridad y confort visual.

Especificaciones espectrales

- Reducir o eliminar la emisión en bandas cortas (< 500 nm), especialmente en UV (300–400 nm) y azul (400–500 nm), mediante:
 - Uso de LED cálidos (≤ 3000 K) con SPD pobre en azul.
 - Lámparas ámbar PC o filtros que bloquen longitudes de onda cortas.
- Verificar la SPD real declarada o medida, no solo la temperatura de color (CCT), ya que dos luminarias con igual CCT pueden diferir significativamente en contenido azul/UV.

Intensidad e iluminancia

- Mantener iluminancias funcionales mínimas en el plano de actividad del vector (0,5–1,5 m) según normativa de seguridad y confort visual:
- Evitar excedentes nocturnos que puedan estimular actividad vectorial.
- Integrar sistemas de dimming o regulación horaria para reducir intensidad tras el pico de uso humano.
- Priorizar diseños que limiten el brillo fuera de la zona de interés para minimizar la visibilidad de la fuente desde puntos no necesarios.

Fotometría y distribución espacial

- Utilizar luminarias con corte total (full cutoff) y ópticas direccionadas para evitar emisiones laterales y ascendentes.
- Incorporar pantallas o viseras (shielding) en instalaciones existentes para reducir el radio de visibilidad de la luz a insectos voladores fuera del área iluminada.
- Evitar luminarias tipo globo u otras con emisión omnidireccional en exteriores.

Índice de reproducción cromática (CRI)

- En zonas de alta endemidad, priorizar CRI moderado (70–80) cuando sea compatible con las exigencias de percepción cromática, ya que CRI muy alto suele asociarse a espectros más amplios con mayor fracción de azul.
- Siempre ponderar la relación CRI–SPD, privilegiando configuraciones con bajo contenido en longitudes de onda cortas.

Operación y mantenimiento

- Programar encendidos y apagados que eviten iluminar antes o después del periodo de uso real.
- En alumbrado público, coordinar con áreas de salud y control vectorial para identificar zonas prioritarias donde aplicar estas configuraciones.
- Incluir criterios entomológicos en licitaciones y pliegos técnicos para alumbrado en áreas con transmisión activa o riesgo elevado.

Contextualización climática y estacional

- En regiones cálido-húmedas (NEA, NOA) donde el vector está activo la mayor parte del año, aplicar estas medidas de forma continua.
- En regiones templadas, concentrar las acciones durante primavera y verano, ajustando niveles e intensidades en el resto del año.
- En áreas de baja o nula presencia del A. aegypti, mantener el enfoque principal en eficiencia energética y confort, sin descuidar criterios básicos de fotometría y SPD.

Limitaciones del estudio

La revisión integra evidencia multidisciplinaria contextualizada para el ámbito urbano y doméstico argentino, pero presenta limitaciones metodológicas y de alcance que condicionan la interpretación y aplicación de los resultados.

- **Escasez de estudios específicos** – La mayor parte de la evidencia sobre atracción lumínica proviene de otros insectos (lepidópteros, coleópteros, mosquitos nocturnos), con respuestas que pueden diferir del A. aegypti. Aunque se incluyeron trabajos sobre A. aegypti y especies afines (A. albopictus, Culex quinquefasciatus), la extrapolación conlleva incertidumbre, sobre todo por diferencias en hábitos circadianos.
- **Variabilidad metodológica** – Los estudios difieren en diseño (laboratorio, semi-campo, campo abierto), escala y control de variables. No existe un protocolo estándar para medir “atracción” o “actividad” en A. aegypti bajo luz artificial, y con frecuencia la SPD no se reporta con precisión, dificultando correlaciones con parámetros técnicos.
- **Falta de cuantificación en campo** – La evidencia de que la luz artificial prolonga la actividad de A. aegypti proviene de experimentos controlados o observaciones indirectas; no hay mediciones directas sobre incidencia de picaduras o transmisión en entornos urbanos reales.
- **Influencia ambiental** – Factores como temperatura, humedad, viento, hospedadores y densidad vectorial modulan la respuesta lumínica y no siempre se controlan. En el NEA y NOA, la abundancia de criaderos y hospedadores podría amplificar el efecto, mientras que en climas templados o áridos el impacto sería menor.
- **Alcance temporal y geográfico** – La revisión priorizó estudios de los últimos 15 años, recurriendo ocasionalmente a trabajos más antiguos, lo que puede reflejar cambios tecnológicos en LED. La aplicabilidad de estudios foráneos depende de la similitud climática y urbana con Argentina, no siempre exacta.
- **Limitaciones en datos técnicos** – La ausencia de curvas espectrales completas y datos estandarizados de fotometría y SPD dificulta evaluar con precisión el contenido UV/azul y verificar la correspondencia entre la configuración real y la especificada.

Estas limitaciones no invalidan las conclusiones, pero subrayan la necesidad de ensayos controlados y monitoreos de campo específicos para A. aegypti, incorporando mediciones

técnicas estandarizadas (SPD, iluminancia, CRI, fotometría) en estudios y gestión de alumbrado público y doméstico.

4.5 Líneas futuras de investigación

La evidencia disponible permite proponer lineamientos preliminares para la selección técnica de luminarias LED con menor potencial de atracción o modulación de la actividad del *Aedes aegypti*. Sin embargo, persisten vacíos de conocimiento que requieren ser abordados mediante investigaciones específicas, con el fin de consolidar criterios basados en datos medidos en condiciones reales de uso.

1. Estudios de campo controlados en entornos urbanos argentinos

- Diseñar y ejecutar ensayos comparativos de luminarias LED con distintas SPD, CCT e iluminancias en barrios con presencia documentada del *A. aegypti*.
- Medir simultáneamente:
 - Actividad vectorial (capturas en trampas y observación directa).
 - Incidencia de picaduras (métodos entomológicos estandarizados).
 - Variables ambientales (temperatura, humedad, velocidad del viento).
- Implementar diseños experimentales con control espacial y temporal, permitiendo aislar el efecto lumínico de otros factores epidemiológicos.

2. Cuantificación del impacto epidemiológico

- Integrar mediciones entomológicas con modelos de riesgo de transmisión para estimar cuánto contribuye la iluminación artificial a la ventana de exposición humana al vector.
- Explorar la relación entre características lumínicas y tasas reales de transmisión en contextos de brote, utilizando datos epidemiológicos georreferenciados.

3. Evaluación de configuraciones lumínicas innovadoras

- Probar fuentes LED con SPD modificada (bajo azul/UV) y luminarias con apantallamiento total en vía pública y peridomicilio, evaluando su desempeño frente a luminarias estándar.
- Analizar luz monocromática ámbar y filtrada como alternativa en espacios residenciales y de recreación.
- Medir el impacto de tecnologías de dimming adaptativo y control horario sobre la actividad vectorial nocturna.

4. Estandarización de parámetros técnicos en estudios entomológicos

- Incorporar de forma sistemática la medición y reporte de:
 - Distribución espectral de potencia (SPD).
 - Temperatura de color correlacionada (CCT).
 - Índice de reproducción cromática (CRI).
 - Iluminancia en el plano del insecto (lux a 0,5–1,5 m).
 - Distribución fotométrica de la luminaria.
- Promover la colaboración entre laboratorios entomológicos y departamentos de ingeniería luminotécnica para mejorar la calidad y comparabilidad de los datos.

5. Estudios circadianos específicos para *Aedes aegypti* bajo LED

- Investigar el efecto de distintos espectros e intensidades LED sobre:
- Expresión de genes reloj.
- Fase y amplitud de la actividad locomotora.
- Conducta de picado fuera de horarios habituales.
- Realizar comparaciones entre poblaciones de distintas regiones climáticas de Argentina para identificar posibles adaptaciones locales.

6. Integración en políticas públicas y normativas

- Desarrollar protocolos de evaluación entomológica previa a licitaciones de alumbrado público en zonas de alta endemidad.
- Incorporar variables de riesgo entomológico en normativas municipales y provinciales sobre iluminación urbana y residencial.
- Promover proyectos piloto que permitan evaluar la efectividad de las medidas propuestas antes de su escalamiento.

5. CONCLUSIONES

La revisión integró evidencia experimental, fisiológica y técnica que permite afirmar que determinadas configuraciones de iluminación LED —particularmente aquellas con mayor proporción de longitudes de onda cortas (UV–azul) y niveles moderados de iluminancia nocturna— pueden modular el comportamiento del *Aedes aegypti*, prolongando sus ventanas de actividad crepuscular hacia horas de la noche. Aunque el vector no presenta fototaxis intensa a larga distancia como otros insectos nocturnos, la luz artificial nocturna actúa como modulador circadiano capaz de aumentar el tiempo de contacto potencial con humanos, especialmente en contextos urbanos de alta densidad vectorial.

En el marco de la selección técnica de luminarias para entornos urbanos en Argentina, se desprende que priorizar espectros cálidos o filtrados con bajo contenido en UV y azul, limitar la iluminancia efectiva en el plano de actividad del vector, y diseñar fotometría que minimice la emisión lateral y ascendente son estrategias compatibles con los objetivos de eficiencia energética y seguridad vial, y con un potencial valor preventivo en salud pública. La implementación de estos criterios resulta particularmente relevante en regiones cálido-húmedas (NEA y NOA), donde la actividad vectorial se extiende gran parte del año, y debería integrarse como componente complementario en el manejo integrado de vectores.

Desde la perspectiva epidemiológica, la iluminación LED no constituye un factor primario de la transmisión del dengue, pero su papel modulador —aunque secundario— no debe ser subestimado. En escenarios de transmisión sostenida, incluso reducciones modestas en la duración o intensidad de la actividad vectorial nocturna pueden traducirse en beneficios acumulativos para la salud pública. Incluir criterios entomológicos en la planificación del alumbrado urbano y doméstico abre una oportunidad de intervención a bajo costo relativo, con beneficios colaterales como la reducción de la contaminación lumínica.

No obstante, persisten limitaciones importantes: la escasez de estudios específicos sobre el *A. aegypti* y LED en condiciones reales, la variabilidad metodológica y la falta de cuantificación

directa del impacto epidemiológico restringen la certeza de las estimaciones. Se requerirán investigaciones de campo controladas en entornos urbanos argentinos que permitan validar y refinar estos lineamientos, integrando mediciones técnicas estandarizadas de SPD, CCT, CRI, iluminancia y fotometría con indicadores entomológicos y epidemiológicos. Solo así será posible consolidar protocolos de iluminación que optimicen simultáneamente la eficiencia energética y la reducción del riesgo vectorial.

6. REFERENCIAS

- Alonso San Alberto, D., Rusch, C., Zhan, Y., Straw, A. D., Montell, C., & Riffell, J. A. (2022). The olfactory gating of visual preferences to human skin and visible spectra in mosquitoes. *Nature Communications*.
- Bagekari, A. (2025). LED Lighting Market Report 2025 (Global Edition). Chicago, EEUU: Cognitive Market Research.
- Baik, L. S., Nave, C., Au, D. D., Guda, T., Chevez, J. A., Ray, A., & Holmes, T. C. (2020). Circadian Regulation of Light-Evoked Attraction and Avoidance Behaviors in Daytime- versus Nighttime-Biting Mosquitoes. *Current biology*, 3252-3259. doi:10.1016/j.cub.2020.06.010
- Briscoe, A. D., & Chittka, L. (2011). Insect vision: Ultraviolet, color, and LED light. *Advances in Insect Physiology*, 151–217. Obtenido de https://www.ledylighting.com/wp-content/uploads/2022/02/InsectVision_UVColorandLEDLight.pdf
- Bruno, R., Farnesi, L., & Araripe, L. (2020). The Effects of Infection on Mosquito Rhythmic Behavior. En D. Claborn, S. Bhattacharya, & S. Roy, *Vector-Borne Diseases - Recent Developments in Epidemiology and Control*. American University of Iraq-Baghdad, Baghdad, Iraq. doi:10.5772/intechopen.83110
- Coetzee, B. W., Gaston, K. J., Koekemoer, L., Kruger, T., Riddin, M. A., & Smit, I. P. (2022). Artificial Light as a Modulator of Mosquito-Borne Disease Risk. *Frontiers in Ecology and Evolution*. doi:10.3389/fevo.2021.768090
- Dietenberger, M., Jechow, A., Kalinkat, G., Schroer, S., Saathoff, B., & Höller, F. (2024). Reducing the fatal attraction of nocturnal insects using tailored and shielded road lights. *Commun Biol*. doi:10.1038/s42003-024-06304-4
- Enel X. (24 de julio de 2025). Historias. Obtenido de <https://www.enelx.com/ar/es/historias/convenio-entre-enel-x-y-edesur-para-instalar-luminarias>
- Estallo, E., Ludueña-Almeida, F., Scavuzzo, C., Zaidenberg, M., Introin, M., & Almirón, W. (2011). Daily oviposition activity of *Aedes aegypti* in Orán, Argentina. *Revista de saúde pública*, 977-980.
- General Roca. (27 de septiembre de 2024). Noticias. Obtenido de <https://generalroca.gob.ar/noticia/462/>
- Grupo La Provincia. (19 de mayo de 2025). Municipales. Obtenido de <https://grupolaprovincia.com/contenido/585415/pergамино-аванзаeninnovacionyeficienciaenergeticaconnuevaspoliticaspubl>

- Hu, X., Whaley, M. A., Stein, M. M., Mitchell, B. E., & O'Tousa, J. E. (2011). Coexpression of Spectrally Distinct Rhodopsins in *Aedes aegypti* R7 Photoreceptors. PLoS ONE 6(8): e23121. doi:10.1371/journal.pone.0023121
- Hug, D., Hugo, E., & Verhulst, N. (2024). Avoid the light to avoid the heat? Thermal and light preferences of *Aedes aegypti* mosquito larvae. Animal Behaviour. doi:10.1016/j.anbehav.2024.10.025
- Kawada, H., Takemura, S.-y., Arikawa, K., & Takagi, M. (2005). Comparative Study on Nocturnal Behavior of *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus*. Journal of medical entomology, 312-8. doi:10.1603/0022-2585(2005)042[0312:CSONBO]2.0.CO;2
- Lighting Global. (junio de 2018). Technical Notes Issue 26. Obtenido de Human Health: LED Lighting, Insects, and Wavelength: <https://www.lightingglobal.org/resource/human-health-led-lighting-insects-and-wavelength/>
- Lima-Camara, T. (2009). Activity patterns of *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) under natural and artificial conditions. Oecologia Australis.
- Liu, X., Yang, S., Yao, Y., Wu, S., Wu, P., & Zhai, Z. (2022). Opsin1 regulates light-evoked avoidance behavior in *Aedes albopictus*. BMC biology, 110. doi:10.1186/s12915-022-01308-0
- Liu, Y.-N., Liu, Y.-J., Chen, Y.-C., Ma, H.-Y., & Lee, H.-Y. (2017). Enhancement of mosquito trapping efficiency by using pulse width modulated light emitting diodes. Scientific Reports. doi:10.1038/srep40074
- Ministerio de Salud - República Argentina. (2024). Boletín Epidemiológico Nacional. CABA: Ministerio de Salud. Obtenido de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2024/04/ben_717_se_32_1982024.pdf
- Ministerio de Salud de la Nación. (2024). Boletín Epidemiológico Nacional N° 757 – SE 20/2024. Obtenido de Dirección de Epidemiología: <https://bancos.salud.gob.ar/recurso/boletin-epidemiologico-nacional-n-757-se-20-2024>
- Mordor Intelligence. (9 de enero de 2025). mordorintelligence.com. Obtenido de South America LED Lighting Market SIZE & SHARE ANALYSIS - GROWTH TRENDS & FORECASTS UP TO 2030: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/south-america-led-lighting-market>
- Oriyomi, M., & Babalola, P. (2020). Comparison of Mosquitoes Response to Different Diodes Wavelengths. International Journal of Science and Research (IJSR). doi:10.21275/SR20630024318
- Pan American Health Organization. (31 de diciembre de 2024). Dengue Multi-Country Grade 3 Outbreak 2024. Obtenido de Situation in the Region of the Americas: <https://www.paho.org/en/topics/dengue/dengue-multi-country-grade-3-outbreak>
- Pan American Health Organization. (2025). Report on the epidemiological situation of dengue in the Americas. PAHO.
- Panthawong, A., Jhaiaun, P., Saeung, M., Sumarnrote, A., Kongmee, M., Ngoen-Klan, R., & Charoenviriyaphap, T. (2021). Comparing Light—Emitting—Diodes Light Traps for Catching Anopheles Mosquitoes in a Forest Setting, Western Thailand. Insects.

- Pawson, S. M., & Bader, M. K. (2014). LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature. *Ecological Applications*, 1561-1568. doi:10.1890/14-0468.1
- Richter-Boix, A. (20 de julio de 2022). mosquitoalert.com. Obtenido de La luz artificial puede alterar la conducta de los mosquitos: <https://www.mosquitoalert.com/la-luz-artificial-puede-alterar-la-conducta-de-los-mosquitos/#:~:text=pipiens,luz%20artificial%20suprime%20su%20actividad>
- Rivas, G., Teles de Freitas, R., Pavan, M., Lima, J., Peixoto, A., & Bruno, R. (2018). Effects of Light and Temperature on Daily Activity and Clock Gene Expression in Two Mosquito Disease Vectors. *Journal of Biological Rhythms*, 272-288.
- Rosario Noticias. (21 de marzo de 2025). Obras. Obtenido de Ambiente: <https://rosarionoticias.gob.ar/page/noticias/id/560503/title/Plan-Led-2025%3A-el-municipio-suma-10-mil-luminarias-y-llicita-el-servicio-de-mantenimiento-del-alumbrado->
- Rund, S. S., Labb, L. F., Benefiel, O. M., & Duffield, G. E. (2020). Artificial Light at Night Increases *Aedes aegypti* Mosquito Biting Behavior with Implications for Arboviral Disease Transmission. *The American journal of tropical medicine and hygiene*, 2450–2452.
- Salles, T., Corrêa, I., Guimarães-Ribeiro, V., Carvalho, E., & Moreira, M. (2021). LED Colour Trap for *Aedes aegypti* Control. Recent patents on biotechnology, 227-331. Obtenido de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34465281/#:~:text=combinations%20showed%20that%20the%20tricolored,experimental%20groups%2C%20the%20tricolored%20trap>
- Servicio Meteorológico Nacional. (2023). Datos climáticos normales 1991–2020: temperaturas y humedad relativa por región. Obtenido de Ministerio de Defensa – SMN: <https://www.smn.gob.ar/clima>
- Shimoda, M., & Honda, K.-i. (2013). Insect reactions to light and its applications to pest management. *Applied Entomology and Zoology*. doi:10.1007/s13355-013-0219-x
- Taylor, B., & Jones, M. (1969). The Circadian Rhythm of Flight Activity in the Mosquito *Aedes Aegypti* (L.): The Phase-Setting Effects of Light-on and Light-Off. *The Journal of experimental biology*, 59-70. doi:10.1242/jeb.51.1.59
- Wakefield, A., Broyles, M., Stone, E. L., Jones, G., & Harris, S. (2016). Experimentally comparing the attractiveness of domestic lights to insects: Do LEDs attract fewer insects than conventional light types? *Ecology and Evolution*, 8028-8036. doi:10.1002/ece3.2527
- Westby, K. M., & Medley, K. A. (2020). Cold Nights, City Lights: Artificial Light at Night Reduces Photoperiodically Induced Diapause in Urban and Rural Populations of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae). *Journal of Medical Entomology*, 1694-1699. doi:10.1093/jme/tjaas139
- Wilson, R., Wakefield, A., Roberts, N., & Jones, G. (2021). Artificial light and biting flies: the parallel development of attractive light traps and unattractive domestic lights. *Parasites & Vectors*. Obtenido de <https://parasitesandvectors.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13071-020-04530-3#:~:text=exist%20for%20Aedes%20aegypti%20,1>
- World Health Organization. (30 de mayo de 2024). Disease Outbreak News. Obtenido de Dengue – Global Situation Available: <https://www.who.int/emergencies/disease-outbreak-news/item/2023-DON518>

LA GESTIÓN DE ACTIVOS FERROVIARIOS POR RCM

Eugenio F. Dattilo^{1*}, Jorge M. Bonnefon², Germán D. Zaupa³, Nahuel Pomiro⁴ Nicolás Di Nardo⁵
Rodrigo Samames⁶

¹ Departamento Académico de Mecánica, UTN - Facultad Regional Avellaneda, Avda. Mitre 5050
Provincia. De Buenos Aires Argentina

^{2,6} Departamento Académico de Mecánica, UTN - Facultad Regional Avellaneda, Avda. Mitre 5050
Provincia. De Buenos Aires Argentina

*Autor a quien se debe dirigir la correspondencia: efdattilo@yahoo.com.ar

RESUMEN

Por su naturaleza tecnológica y el alcance de sus servicios, los activos o cuerpos de Ingeniería Ferroviarios necesitan de un permanente proceso sistémico de reinversión y gestión. Cuando este conjunto de acción es deficitario se afecta un bien primordial de la inversión realizada que resulta su confiabilidad y con, este déficits, la aparición de costos emergentes o costos no esperados en el uso de un activo en servicio que muestran su inhabilidad contextual para desarrollar correctamente su ciclo de vida funcional.

En el artículo “Mantenimiento Centrado en la confiabilidad- estrategias para el ciclo de vida (J. Moubray 2021) [1] se define al Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM por sus siglas en Inglés de Reliability centered maintenance) como “un proceso que se utiliza para determinar los requerimientos del mantenimiento de los activos físicos en su contexto operacional”; hacer mención al contexto significa relacionar a la acción de mantenimiento con la incertidumbre en la performance real de los equipos o productos o cuerpos de Ingeniería en su verdadera condición operativa.

Este vínculo causal entre el RCM y el contexto operacional, pone en cuestión la forma de gestionar el ciclo de vida de activos de uso intensivo, como es el caso de los cuerpos de Ingeniería de los servicios Ferroviarios, especialmente cuando, como sucede en la Argentina, los diseños de estos cuerpos operativos son No situados, es decir no realizados para una locación determinada.

Este trabajo se encuentra basado en la primera etapa de implementación del Proyecto de Investigación “Determinación de un modelo de gestión de riesgos y fallas en la operación ferroviaria por RCM III” (Dattilo et al 2024) en la que se realizó un Análisis PESTEL (Político social, económico, tecnológico, ecológico y legal) a fin establecer el contexto o escenario potencial de aplicación de técnicas RCM en los Ferrocarriles Argentinos, sus limitantes, posibilidades y alcances, para observar si es posible implementar el enfoque basado en la confiabilidad y el cuidado de activos bajo aplicación de Normas específicas como la ISO 55.001 de gestión de activos y la SAE JA 1011 [2]

Palabras clave:

Confiabilidad – Ferrocarriles – Contextos – Ingeniería.

INTRODUCCIÓN

Cuando el uso de activos es intenso y es necesaria una alta disponibilidad, como es el caso de los activos ferroviarios, el compuesto de acciones proactivas: Preventivo (actuar antes de la pérdida del régimen) Predictivo (actuar ante la pérdida del régimen) puede ser moderada por tres estrategias, el BCM (Mantenimiento centrado en el negocio) el TPM (mantenimiento centrado en la disponibilidad y productividad del activo) o el RCM (Mantenimiento Centrado en la confiabilidad)

Este último se halla vinculado a la incertidumbre que genera la aparición de fallas en los equipos y partes mantenibles y su impacto en el ciclo de vida de los equipos o cuerpos de Ingeniería que se desea mantener.

Los trabajos sobre la confiabilidad en el mantenimiento en la década del 90 (Moubray 1997) conocidos como RCM (Reliability Centered Maintenance) [3] permitieron la formación de criterios para este tipo de mantenimiento, establecidos metodológicamente luego en la Norma SAE JA 1011/12, (SAE 2002).

El RCM II (Moubray 2004) y actualmente el RCM III integraron el concepto de riesgo bajo ISO 31000 (ISO 2014) para la gestión de riesgo y 55000 (ISO 2018) para la gestión de activos.

En el escenario Ferroviario entran en pugna dos criterios estratégicos básicos, según se observe la disponibilidad o la confiabilidad de los activos dinámicos (usualmente, coches, vagones y locomotoras).

Bajo el criterio de disponibilidad con Mantenimiento proactivo, el activo es crítico, el tiempo flotante o de no actividad es amplio en promedio y problemático y tiene efectos en el servicio o producción, el movimiento de stock o reposición es planificado costoso y frágil en el sentido de que no se halla preparado para lo inesperado.

El criterio basado en la confiabilidad en cambio aparece cuando Los activos son operativamente complejos, costosos de reemplazar, su vida en servicio es prolongada, y se impone el estudio de la naturaleza de las fallas a los que se encuentran expuestos, considerando además que los diseños son débiles y no situados aumentan el riesgo de falla.

La figura muestra el ordenamiento potencial del criterio de mantenimiento cuando refiere a la disponibilidad o al cuidado de activos en ciclos intensivos de trabajo bajo contextos de incertidumbre:



Figura 1 Ordenamiento por disponibilidad y confiabilidad

Es factible estudiar y poner en cuestión la opción disponibilidad o confiabilidad si se establecen variables del contexto que permiten su análisis.

DESARROLLO

Los contextos problemáticos:

El manejo racional de activos o cuerpos de Ingeniería cuando son complejos en su conformación tecnológica y su operatividad es crítica, es decir disminuyen los tiempos de flotación, el backlog (tiempo de retardo en cumplir órdenes de mantenimiento) es bajo y el activo es utilizado en forma intensiva, los criterios para formalizar tiempos fijos de mantenimiento proactivos deben ajustarse a las problemáticas particulares que enfrentan en su condición operativa.

Bajo esas primeras condiciones en un apartado del análisis PESTEL del contexto tecnológico ferroviario actual, elaborado junto a un trabajo desarrollado en la ex Gerencia de Innovación (2022) [4] que establece las condiciones de estudio técnico del RCM aplicados a diversos grupos tecnológicos (bogie, sistemas de tracción y freno eléctrico, freno neumático, compresor general y elementos auxiliares de potencia) identificó dos causales centrales en la afectación contextual a la aplicación de técnicas RCM bajo los siguientes déficits que generan potencialmente costos emergentes, es decir costos no esperados que aparecen durante el ciclo de vida del activo:

- La reposición prematura o aleatoria de partes de stock o Ferro partes de mantenimiento
- La falta de tecnología y estrategia de control de régimen. (tercer tecnología) en ausencia de un sistema integral de gestión de activos con objetivos basados en la mantenibilidad.

Los fenómenos de reposición de activos por stock de mantenimiento en diseños no situados (es decir de uso fuera de la locación del diseño original) cuando estos son proactivos y por lo tanto programados, tienen como principales factores de déficit la imposibilidad o dificultad de reponer piezas partes o conjuntos originales; esto obliga a desarrollar proveedores locales que deben fabricar clones o partes sustitutas a través de procesos de reingeniería, cuando, como es el caso de ferrocarriles, la fabricación resulta de baja escala.

Como demuestra el proyecto de Investigación “Determinación del escenario de segunda parte ferroviaria con análisis de los limitantes al proceso de sustitución de ferropartes de la UTN (Dattilo et al 2017) [5] no es posible absorber los costos de Ingeniería necesarios en baja escala ferroviaria por lo tanto se fuerzan reparaciones sobre los cuerpos originales o en muchos casos se canibalizan unidades detenidas. En situaciones específicas el funcionamiento afecta regímenes normales de trabajo, cuando se trata de componentes que no inhabitan la función motora principal (por ejemplo elementos de suspensión o de confort o iluminación de bajo riesgo operacional).

El sistema propuesto en 2011 por el Estado Nacional para desarrollar proveedores ferroviarios con el fin de sustituir importaciones dio muy pocos o nulos resultados como también se establece en el mencionado proyecto.

Los deficitarios factores estructurales, entre ellos, el estado de las vías como elemento principal, incrementan la localización de determinados desgastes y aceleran procesos naturales de fallas previstas en el diseño. En conjunto el comportamiento del esquema de reposición de stock de mantenimiento produce costos emergentes o no esperados en forma temprana.

Cuando estos componentes inhiben la función motora principal o afectan elementos de seguridad, los tiempos de flotación y backlog se elevan generando costos de inmovilidad del activo que incluso pueden resultar permanentes.

En el artículo digital trilema del RCM (M. Vega 2020) [6] que pone en tensión la gestión de repuestos y de mantenimiento se desarrolla la siguiente gráfica que nos permite establecer la ubicación de costos emergentes en la vida de un activo mantible:

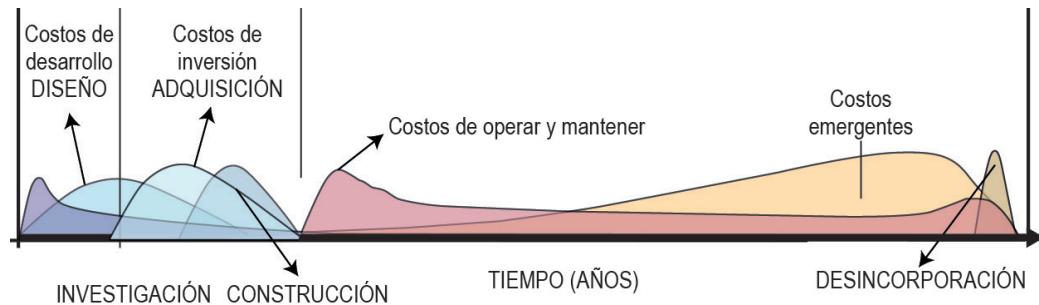


Figura 2 Costos emergentes en el ciclo de vida de un activo

El segundo factor para considerar detectado en el estudio del contexto tecnológico es la falta de tecnología del control operativo, algo que afecta directamente al RCM que busca determinar en forma indicaria la actuación de mecanismos de falla que afecten el régimen de trabajo de un componente o conjunto.

La Tero tecnología representa el empleo de la tecnología y la gestión para optimizar el ciclo de vida de un activo a través de las actividades de Mantenimiento, el análisis PESTEL determinó la inexistencia de elementos sistémicos y políticas integradas a objetivos específicos para generar el tratamiento del activo operativo, la reinversión ferroviaria es espasmódica y no contemplan planes racionales que le den marco a una estrategia de largo plazo.

Actualmente se encuentra en vigencia la emergencia ferroviaria (decreto 525/2024) que se orienta a la seguridad operacional, mientras las estructuras administrativas que definen el tamaño organizacional se reducen (especialmente en personal calificado), afectando la inteligencia y capacidad operativa, con el tiempo se demostrará que reemplazar personas por tecnología ha sido siempre una mala idea.

Los Instrumentos para el mantenimiento:

Desde su historia el mantenimiento de activos ferroviarios tiene un perfil estratégico proactivo, basado principalmente en acciones preventivas, la respuesta de stock y reposición de partes y componentes se fue adecuando a un logro vinculado a la disponibilidad operativa del activo. Bajo gestión estatal y peor aún bajo gestión privada, los problemas de reinversión se hicieron notables debido especialmente a los procesos de outsourcing de la década del 70 que destruyó la base productiva interna ferroviaria tercerizando gran parte de la actividad y en la década del 90 con un proceso de downsizing que redujo el tamaño administrativo de la empresa a fin de adecuar el servicio a las posibilidades de financiarlo, sin considerar el enorme costo social y la pérdida de Know how o conocimientos que se producía.

Estos procesos y otros más mantuvieron el esquema proactivo vinculado a la disponibilidad, pero con altos costo emergente y destrucción del ciclo de vida de los activos.

La gestión de stock se volvió cada vez más reactiva a las necesidades de disponibilidad. Siguiendo el teorema de Timbergren cada nuevo objetivo debe contener un nuevo instrumento para lograrlo (*Economic Policy: Principles and Design*, 1956) [7] el mantenimiento centrado en la

confiabilidad o RCM viene a cubrir ese déficits en la gestión de activos como instrumento para el logro de la confiabilidad, entendida como el cumplimiento del ciclo de vida de un activo sin costos emergentes mayores, formando parte de un criterio de trabajo basado en la gestión integral.

DISCUSIÓN: sobre la factibilidad del RCM en contextos ferroviarios actuales:

Establecida la deriva del mantenimiento con objetivo en la disponibilidad del activo ferroviario y la influencia en ellas de los fenómenos de stock con sus dificultades y falencias, nos queda ver si es posible instrumentar el RCM en el ámbito ferroviario actual para, utilizando como eje de la discusión la influencia de los fenómenos de gestión de stock de activos.

El mantenimiento proactivo centrado en la disponibilidad resulta una preocupación vinculada al régimen operativo del activo bajo circunstancias planificadas complementadas por acciones reactivas que en muchos casos ocultan las falencias de stock de reposición.

El RCM en cambio resulta de un análisis integral enfocado en la funcionalidad del activo y sus potenciales fallas, es importante planificar basado en el contexto en el que se dan las operaciones del activo a fin de asegurar su ciclo de vida y poner en control los costos emergentes.

El déficit de reposición por stock y almacén con la intervención de proveedores blandos de ferropartes con baja Ingeniería, y acceso a procesos especiales de fabricación para sustituir elementos originales, más la imposibilidad de reinvertir correctamente durante el ciclo de vida de los activos ferroviarios crean una contradicción en la correcta gestión de activos. Basados en el trilema de mundell que se da cuando resulta imposible la ocurrencia conjunta de tres objetivos (Mundell-Fñeming 1960) [8] podemos establecer que una incorrecta gestión de activos puede darse con un mantenimiento basado en disponibilidad con altos costos emergentes, la disponibilidad puede darse en condiciones de confiabilidad pero no bajo mala gestión.

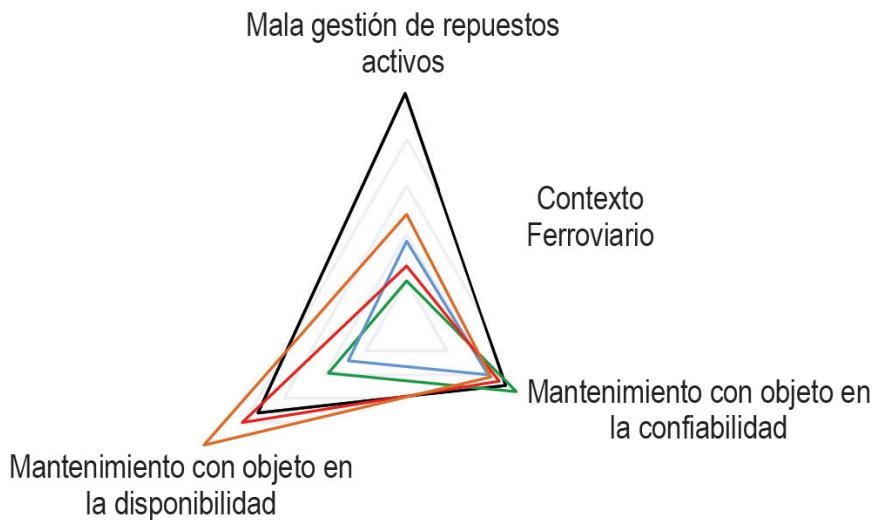


Figura 3 Trilema del RCM en contexto Ferroviario

Finalmente, la confiabilidad de activos no puede darse en condiciones de mala gestión ya que cuando se busca la confiabilidad con una mala gestión de activos no puede asegurarse el logro de la disponibilidad

CONCLUSIONES

El RCM es un instrumento de mantenimiento a incorporar en las organizaciones cuando sus activos resultan funcionalmente complejos y su régimen de trabajo es exigente o crítico, bajo estas condiciones puede lograrse que los activos operativos cumplan ciclos de vida para los que fueron diseñados.

Sin embargo, sus precondiciones de aplicación resultan muy exigentes, en escenarios precarizados, con contextos altamente problemáticos resulta una pretensión saludable pero incorrecta desde el punto de vista operativo.

Bajo las condiciones actuales el mantenimiento ferroviario se encuentra volcado a la disponibilidad, asegurando el servicio, pero con altos costos emergentes y drásticas reducciones del ciclo de vida de sus activos, de modo que cuando se adquieren coches ferroviarios o vagones u otros activos sabemos que ingresan a un sistema de cuidado de baja calidad.

Una ventaja importante del RCM resulta que obliga a entender profundamente el origen causal natural o aleatorio y los mecanismos de actuación de las fallas potenciales que afectan a los activos mantenibles bajo contextos reales, activa la formación de conocimiento de la tecnología y permite la formación integral de personas calificadas para ejecutar acciones de alto impacto en la conservación de bienes de capital. Esa ventaja de poner en valor el conocimiento de las personas se pierde en el día a día de la disponibilidad, es ese el mayor déficit que podemos encontrar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] Moubray (2021) Mantenimiento centrado en la confiabilidad Artículo digital
- [2] Society of Automotive Engineers (2009) Norma SAE JA 2011
- [3] Moubray, (1997) RCM II Reliability centered Maintenance 2 ed. Industrial Press Nueva York
- [4] Luna (2022) Mantenimiento centrado en la confiabilidad. Tesis de grado desarrollada para la Gerencia de Innovación ferroviaria.
- [5] Dattilo et al (2017) Determinación del escenario de segunda parte ferroviaria con análisis de los limitantes al proceso de sustitución de ferropartes
- [6] (M. Vega (2020) Trilema del RCM artículo digital.
- [7] Timbergen (1956) Economic Policy: Principles and Design, artículo digital.
- [8] (Mundell-Fñeming (1968) Man and Economics: The Science of Choice, Mc graw Hill

INTEGRIDAD ACADÉMICA EN TIEMPOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL GENERATIVA: NUEVAS FORMAS DE AUTORÍA EN ESPACIOS ACADÉMICOS

María Cristina Kanobel^{*1}

¹ Universidad Tecnológica Nacional

Avenida Ramón Franco 5050, Villa Domínico, (1870), Avellaneda, Buenos Aires, Argentina

**Autora a quien se debe dirigir la correspondencia: mkanobel@fra.utn.edu.ar*

RESUMEN

La inclusión de herramientas de Inteligencia Artificial Generativa en espacios académicos representa un cambio paradigmático que trasciende lo tecnológico para cuestionar fundamentos sobre el conocimiento, la creatividad y la autenticidad intelectual. Este artículo examina los desafíos éticos para la integridad académica, analizando las tensiones emergentes y las oportunidades transformadoras desde las perspectivas de estudiantes, docentes e instituciones. A partir de una revisión documental sistemática, se exploran las nuevas formas de colaboración humano-máquina y las competencias críticas requeridas para navegar este ecosistema digital. Frente a este panorama, el trabajo introduce y desarrolla el concepto de *autoría aumentada* y el de *evaluación aumentada* como marcos teóricos y prácticos para guiar una integración responsable. El objetivo es avanzar hacia una ética de la co-creación que, superando los enfoques tradicionales, promueva una cultura académica crítica y honesta que reconozca tanto el potencial como las limitaciones de estas herramientas emergentes.

Palabras clave: integridad académica; inteligencia artificial generativa; ética; educación superior; autoría aumentada; evaluación aumentada; alfabetización en IA.

ABSTRACT

The integration of Generative Artificial Intelligence tools in higher education represents a paradigm shift that transcends technological dimensions to address fundamental questions about knowledge, creativity, and intellectual authenticity. This article examines the ethical challenges to academic integrity posed by these technologies, analysing emerging tensions and transformative opportunities from the perspectives of students, faculty, and institutions. Through a systematic literature review, it explores new forms of human-machine collaboration, and the critical competencies required to navigate this new digital ecosystem. To address this landscape, this paper introduces and develops the concepts of augmented authorship and augmented assessment as theoretical and practical frameworks to guide a responsible integration. The goal is to advocate for an ethics of co-creation that moves beyond traditional approaches, fostering a critical and honest academic culture that acknowledges both the potential and the limitations of these emerging tools.

Keywords: academic integrity; generative artificial intelligence; ethics; higher education; augmented authorship; augmented assessment; AI literacy

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la popularidad y rápida evolución de diversas herramientas de Inteligencia Artificial Generativa (que llamaremos IAGen) ha transformado múltiples ámbitos de la experiencia humana, siendo el campo de la educación superior uno de los más profundamente impactados (Gallent-Torres et al., 2023; Cotton et al., 2023). Esta transformación no se limita a la simple inclusión de nuevas tecnologías, sino que representa un cambio paradigmático en la forma en que concebimos los procesos de creación, transmisión y validación del conocimiento (Rudolph et al., 2023).

Herramientas como ChatGPT, Gemini, Claude, Copilot, entre otras, junto con aplicaciones especializadas como, ChatPDF, Grammarly, Quillbot para procesamiento de texto, y Dall-E, Midjourney, Canva para generación de contenido visual, han experimentado una evolución extraordinaria en un corto tiempo, pasando de ser curiosidades tecnológicas a convertirse en componentes integrales de la cotidianidad académica de docentes, estudiantes e investigadores (Kasneci et al., 2023; Baidoo-Anu & Owusu Ansah, 2023). Esta integración ha revolucionado profundamente los procesos de enseñanza, aprendizaje, evaluación e investigación, generando a la vez oportunidades y desafíos éticos que requieren análisis crítico y respuestas institucionales reflexivas.

La irrupción tecnológica de la IAGen, particularmente notable desde el lanzamiento público de ChatGPT en noviembre de 2022, ha generado un espectro amplio de opiniones y reacciones institucionales (Tlili et al., 2023). Inicialmente, el panorama se caracterizó por respuestas polarizadas: mientras algunas instituciones educativas optaron por prohibiciones, considerando estas herramientas como amenazas directas a la integridad académica, otras comenzaron a explorar cautelosamente su potencial para su integración, reconociendo que representan una transformación tecnológica profunda y duradera, no una moda pasajera (Zhai, 2022; Lim et al., 2023).

Esta diversidad de respuestas institucionales refleja la complejidad inherente del fenómeno y la necesidad de enfoques más matizados y reflexivos (Dwivedi et al., 2023). Además, la experiencia acumulada en estos primeros años de adopción masiva muestra que ni la prohibición total ni la adopción acrítica constituyen estrategias efectivas para gestionar las nuevas preguntas y situaciones que presenta la inclusión IAGen en contextos académicos.

Si bien la inclusión de la IAGen ofrece numerosas oportunidades transformadoras para la educación superior, incluyendo la personalización del aprendizaje, la retroalimentación instantánea y contextualizada, la generación automatizada de recursos y materiales para la práctica docente, el desarrollo de experiencias de aprendizaje tanto adaptativo como interactivo, y la democratización del acceso a herramientas de creación de contenido (Chassignol et al., 2018; Chen et al., 2020), también plantea importantes cuestiones éticas fundamentales sobre la integridad académica que requieren atención prioritaria y sistemática.

Entre las principales preocupaciones identificadas en la literatura emergente se encuentran la fiabilidad y veracidad de la información generada, dado que los modelos generativos pueden producir “alucinaciones” o fabricar datos falsos con apariencia de autenticidad (Ji et al., 2023); la falta de transparencia respecto a las fuentes utilizadas para generar contenido, lo que complica la verificación y atribución adecuada; las implicaciones para la privacidad y seguridad de los datos personales e institucionales; y la emergencia de nuevas formas sofisticadas de plagio y fraude académico que pueden suplantar la autoría humana de manera prácticamente indetectable (Perkins, 2023; Weber-Wulff et al., 2023).

Estas cuestiones han llevado a la necesidad de establecer directrices claras, políticas de uso responsable y marcos éticos que se ajusten a los códigos de conducta académica y a las políticas de integridad de las instituciones de educación superior (Eaton, 2023). La discusión actual se centra en cómo articular, de forma coherente y efectiva, la educación, la innovación tecnológica y la integridad académica desde una perspectiva integrada, considerando las necesidades y perspectivas del alumnado, del profesorado y de las instituciones, con el objetivo fundamental de promover un uso responsable y ético de la tecnología que permita aprovechar sus beneficios transformadores sin comprometer la autenticidad, la rigurosidad y la integridad del conocimiento académico (Sok & Heng, 2023).

Simultáneamente, esta irrupción tecnológica abre nuevas oportunidades para repensar conceptos fundamentales como la autoría, la originalidad, la creatividad y la ética en el trabajo intelectual contemporáneo. En un contexto donde los límites tradicionales entre lo humano y lo artificial se van fusionando en forma progresiva, surge la necesidad de problematizar qué significa “producir conocimiento con honestidad” en la era de la colaboración humano-máquina, cómo desarrollar criterios justos y apropiados para la evaluación de trabajos que incorporan asistencia de IA, y qué competencias éticas, críticas y digitales deben promover y desarrollar las instituciones educativas para preparar a estudiantes y docentes para este nuevo ecosistema académico (Bearman et al., 2023).

Este trabajo, fundamentado en una investigación documental sistemática, amplía la mirada analítica incorporando percepciones y experiencias del estudiantado, marcos normativos, nuevas formas de autoría y co-creación, y las estrategias pedagógicas y tecnológicas desarrolladas para prevenir el plagio automatizado y promover el uso ético de la IAGen. El objetivo es contribuir a la construcción de un marco integrador para abordar los desafíos y oportunidades de la integridad académica en la era de la inteligencia artificial generativa.

Integridad Académica: redefiniendo fundamentos en la era de la colaboración humano-máquina

La integridad académica, tradicionalmente conceptualizada como un conjunto de valores y principios éticos que guían la producción de conocimiento en contextos educativos y científicos, requiere una reconceptualización profunda en el contexto de la era digital y la inteligencia artificial generativa. Este concepto, que históricamente ha incluido la honestidad intelectual, la equidad en la evaluación, la responsabilidad en la investigación y el respeto por la autoría intelectual (Tauginiené et al., 2018; Bretag, 2016), debe ahora ser analizada para abarcar las complejidades emergentes de la colaboración humano-máquina.

La definición clásica de integridad académica, establecida por el International Center for Academic Integrity, identifica seis valores fundamentales: honestidad, responsabilidad, equidad, confianza, respeto y coraje (Fishman, 2014). Sin embargo, la irrupción de la IAGen obliga a revisar y ampliar estos conceptos fundamentales, planteando interrogantes complejos: ¿es posible mantener una concepción tradicional de autoría cuando parte significativa del contenido intelectual es sugerido, generado o refinado por una IAGen? ¿Cómo se redefine la honestidad intelectual en contextos donde la frontera entre el pensamiento humano y la asistencia algorítmica se vuelve cada vez más difusa? (AlAfnan et al., 2023; Stokel-Walker, 2022).

De estas consideraciones surge un nuevo concepto de autoría que reconozca y legitime una co-construcción deliberada e informada entre la inteligencia humana y la tecnología, siempre que

esta colaboración se sustente en principios de transparencia, reflexión crítica y responsabilidad ética sobre el uso de estas herramientas (Galli & Kanobel, 2023; Herrera Romero, 2025). Esta categoría emergente, que denominaremos “*autoría aumentada*”, no implica la sustitución del pensamiento humano por la automatización, sino la potenciación de las capacidades cognitivas humanas a través de la colaboración inteligente con sistemas de IA.

Esta *autoría aumentada* se caracteriza por la transparencia en el proceso de creación, donde se documenta y comunica claramente el rol de la IA en la producción del contenido, la reflexión metacognitiva sobre el uso de herramientas de IA, evaluando críticamente las contribuciones algorítmicas; la responsabilidad intelectual de autoría humana, que mantiene el control editorial y la responsabilidad final sobre el contenido producido y la adición de valor humano distintivo que trasciende el simple agregado de contenido generado automáticamente (Borji, 2023).

Esta nueva concepción debe sustentarse en los marcos emergentes de la ética digital, que proporciona principios normativos para la toma de decisiones en contextos tecnológicos complejos (Floridi et al., 2018). Particularmente, en el contexto de la educación superior, la ética digital debe enfatizar la importancia de la transparencia algorítmica, la responsabilidad en el uso de datos, la equidad en el acceso a tecnologías y la preservación de la autonomía y dignidad humanas en contextos de interacción con sistemas artificiales.

TENSIONES Y DESAFÍOS EMERGENTES

La omnipresencia de herramientas de IAGen ha facilitado la aparición de formas sofisticadas y evolutivas de plagio automatizado y deshonestidad académica, que afectan tanto al estudiante como al profesorado y representan desafíos sin precedentes para los sistemas tradicionales de evaluación y control de integridad (Perkins, 2023). Estas nuevas modalidades trascienden las formas convencionales de plagio textual para incluir prácticas más complejas y difíciles de detectar.

Entre las prácticas emergentes más preocupantes se identifican la apropiación de ideas y argumentos generados por IA sin reconocimiento ni citación adecuada, que representa una forma sofisticada de plagio conceptual; la fabricación automatizada de datos, estadísticas y evidencias que pueden parecer auténticas pero carecen de respaldo empírico real; el uso de referencias bibliográficas falsas o inexistentes generadas por IA, que compromete la trazabilidad y verificabilidad del conocimiento académico; la dependencia acrítica del contenido generado, donde estudiantes y académicos incorporan información sin verificación ni análisis crítico y la comercialización de trabajos académicos generados automáticamente, que representa una forma industrializada de fraude académico (Weber-Wulff et al., 2023).

La literatura emergente identifica varias dimensiones específicas del fraude académico facilitado por IA que van más allá de las categorizaciones tradicionales. El *fraude de proceso* implica utilizar IA para completar procesos de pensamiento que deberían ser desarrollados por el estudiante, mientras que el *fraude de producto* se manifiesta cuando se presenta contenido generado por IA como producción propia sin reconocimiento. El *fraude de atribución* ocurre cuando se atribuyen incorrectamente fuentes o autoría a contenido generado, y el *fraude de competencia* surge cuando se simula dominio de habilidades o conocimientos que no han sido efectivamente desarrollados. Finalmente, el *fraude de originalidad* se presenta cuando se considera como innovador o creativo contenido que replica patrones existentes sin aporte distintivo humano (Abbas et al., 2023).

Los sistemas anti plagio tradicionales, diseñados para identificar similitudes textuales en bases de datos de documentos existentes, muestran limitaciones significativas para detectar contenido generado por IA, ya que estos sistemas producen textos únicos que no coinciden con fuentes existentes (Sadasivan et al., 2023). Esta brecha tecnológica ha creado una ventana de vulnerabilidad en los sistemas de control de integridad académica. Los detectores de IA desarrollados específicamente para identificar contenido generado artificialmente presentan tasas de error considerablemente elevadas, con problemas significativos de falsos positivos y falsos negativos (Mitchell et al., 2023). Estudios recientes (Elkhatat et al., 2023; Sullivan et al., 2023; Weber-Wulff et al., 2023) indican que estos sistemas pueden tener tasas de error de entre 30 a 50%, lo que los hace inadecuados para tomar decisiones académicas definitivas.

La tensión entre el potencial creativo y transformador de estas herramientas y su uso deshonesto o acrítico genera un clima de incertidumbre y también de desconfianza que puede afectar la cultura académica institucional. Esta situación requiere respuestas integradas que combinen enfoques pedagógicos innovadores, desarrollos tecnológicos apropiados y marcos institucionales claros y actualizables (Eaton, 2023). La erosión de la confianza académica tradicional plantea interrogantes fundamentales sobre la naturaleza de la evaluación, la validación de los aprendizajes y la certificación de competencias en contextos donde la colaboración humano-máquina se vuelve omnipresente. Esta situación demanda una reconceptualización profunda de los procesos de evaluación y acreditación académica.

HACIA NUEVAS COMPETENCIAS PARA LA APROPIACIÓN ÉTICA DE LA IA GENERATIVA

Para una apropiación ética y efectiva de la IAGen, se requiere el desarrollo de nuevas formas de alfabetización digital crítica que trascienden el simple uso instrumental de herramientas tecnológicas. Esta alfabetización implica no sólo dominar técnicamente las herramientas de IA, sino también desarrollar una comprensión profunda de sus lógicas de funcionamiento, limitaciones estructurales, sesgos algorítmicos inherentes y responsabilidades éticas asociadas a su uso (Ng et al., 2021).

En este contexto, la *alfabetización crítica en IA* emerge como una competencia fundamental que trasciende el simple uso instrumental de herramientas tecnológicas para incluir la comprensión profunda de los principios de funcionamiento, las limitaciones estructurales, los sesgos inherentes y las implicaciones éticas de los sistemas de inteligencia artificial (UNESCO, 2023). Esta alfabetización crítica incluye una comprensión técnica básica sobre el funcionamiento de los modelos de lenguaje, una conciencia crítica sobre las limitaciones y sesgos de los sistemas de IA, habilidades para evaluar la calidad y veracidad del contenido generado, capacidad para integrar de manera ética y reflexiva las herramientas de IA en procesos de aprendizaje y creación y responsabilidad en la comunicación y atribución del uso de IA.

El estudiantado debe desarrollar competencias específicas de metacognición para reflexionar sobre el proceso de escritura, investigación y creación intelectual. La conciencia metacognitiva se manifiesta como la capacidad para reflexionar sobre sus propios procesos de pensamiento y aprendizaje, identificando dónde y cómo la IA puede complementar sus habilidades sin sustituir el pensamiento crítico. Las competencias de atribución y co-creación representan habilidades para documentar, comunicar y evaluar éticamente la colaboración con sistemas de IA. El pensamiento crítico aplicado implica la capacidad para evaluar la calidad, veracidad y relevancia del contenido

generado por IA, mientras que las habilidades de verificación se refieren a las competencias para contrastar y validar información generada automáticamente. Finalmente, la responsabilidad intelectual comprende la comprensión de las implicaciones éticas y académicas del uso de IA en contextos educativos (Long & Magerko, 2020).

El profesorado, por su parte, debe incorporar y desarrollar competencias complejas relacionadas con la ética de la inteligencia artificial, el rediseño pedagógico para la era digital y el modelado de usos responsables de tecnología. En el ámbito ético y conceptual, esto incluye la comprensión profunda de los principios éticos aplicados a la IA en educación, el conocimiento de los marcos normativos emergentes sobre uso responsable de IA, la capacidad para facilitar discusiones éticas sobre tecnología y educación, y la comprensión de las implicaciones sociales y culturales de la IA generativa.

Las competencias pedagógicas del profesorado abarcan el rediseño de tareas y actividades que favorezcan la originalidad, el pensamiento crítico y la creatividad humana, el desarrollo de estrategias de evaluación que reconozcan y valoren la colaboración humano-máquina responsable, la creación de experiencias de aprendizaje que integren efectivamente herramientas de IA, y la capacidad para proporcionar retroalimentación constructiva sobre el uso de IA en trabajos académicos. En el plano tecnológico, se requiere una comprensión técnica básica del funcionamiento de sistemas de IA generativa, habilidades para evaluar la calidad y propiedad de diferentes herramientas de IA, capacidad para mantenerse actualizado sobre desarrollos tecnológicos relevantes, y competencias para integrar herramientas de IA en su propia práctica docente e investigativa.

El desarrollo de competencias digitales docentes, conceptualizadas en marcos como DigCompEdu (Redecker, 2017), debe expandirse para incluir competencias específicas relacionadas con la IAGen. Estas competencias incluyen comprensión pedagógica del potencial y limitaciones de la IA en contextos educativos, habilidades para diseñar experiencias de aprendizaje que integren de manera efectiva herramientas de IA, capacidad para evaluar y proporcionar retroalimentación sobre trabajos que incorporan asistencia de IA, competencias para modelar y enseñar el uso ético de herramientas de IA; y liderazgo en la transformación digital responsable de prácticas educativas.

Las instituciones educativas deben desarrollar capacidades organizacionales específicas para gestionar efectivamente la transformación digital, incluyendo el liderazgo en innovación educativa para guiar procesos de cambio tecnológico y pedagógico, la gestión de políticas digitales para desarrollar, implementar y actualizar marcos normativos apropiados, sistemas de formación continua para el desarrollo profesional continuo de docentes y personal, capacidades de investigación y evaluación para estudiar el impacto de la IA en contextos educativos y habilidades de colaboración interinstitucional para participar en redes y comunidades de práctica sobre IA y educación.

En este sentido, los marcos institucionales para la gobernanza de la IA en educación superior deben integrar principios de transparencia, responsabilidad, equidad y sostenibilidad, estableciendo políticas claras pero flexibles que permitan la innovación responsable mientras protegen los valores fundamentales de la integridad académica (Holmes & Tuomi, 2022).

La literatura sugiere la necesidad de desarrollar marcos de competencias integradas que combinen habilidades técnicas, éticas, pedagógicas y reflexivas. El marco AI Literacy propuesto por Long & Magerko (2020) incluye el reconocimiento como capacidad para identificar cuándo y cómo se está utilizando IA, la comprensión referida al conocimiento sobre cómo funciona la IA, la aplicación como habilidades para usar IA de manera efectiva y apropiada, la evaluación entendida como

capacidad para evaluar críticamente sistemas y contenido generado por IA, y la creación definida como competencias para desarrollar o personalizar aplicaciones de IA.

Estos marcos deben ser contextualizados y adaptados a las necesidades específicas de diferentes disciplinas, niveles educativos y contextos institucionales, reconociendo que la alfabetización en IA no es una competencia única sino un conjunto diverso de habilidades y conocimientos que debe desarrollarse de manera situada y progresiva.

MARCO METODOLÓGICO

En relación con el objeto de estudio, este trabajo adopta en forma explícita el uso de modelos de lenguaje de gran tamaño o Large Language Models (LLM) como asistentes de traducción de textos en etapas previas de búsqueda y revisión bibliográfica y, posteriormente, en instancias de edición del texto. La colaboración de los LLM se enmarcó en la lógica de concepto de *autoría aumentada* propuesta en este artículo, actuando como herramientas de apoyo para la reorganización de secciones, la mejora estilística de párrafos y títulos y la verificación preliminar de coherencia interna del texto. Todo el contenido ajustado o reorganizado mediante los LLM fue evaluado, revisado y editado por la autora, garantizando que las decisiones finales sobre estructura, argumentación y selección respondieran a un criterio humano informado. Esta práctica no solo permitió exemplificar el uso responsable y transparente de la IA generativa en un proceso académico real, sino también aportar una experiencia situada que nutre la reflexión teórica sobre la colaboración ética y crítica entre humanos y sistemas de IA en la producción intelectual.

Este estudio se abordó a partir de un enfoque metodológico mixto, integrando una revisión documental sistemática con elementos de análisis crítico-hermenéutico que permitieron abordar las implicaciones éticas y el impacto multidimensional de la incorporación de la IAGen en la educación superior. Esta aproximación responde a las mejores prácticas descritas en la literatura sobre revisiones de tecnología educativa (Gough et al., 2017) y toma como referencia metodologías consolidadas aplicadas en investigaciones previas sobre IA y educación, tales como revisiones sistemáticas, metaanálisis y estudios de alcance descriptivo (Zawacki-Richter et al., 2019). De esta forma, el enfoque adoptado, de carácter interpretativo-crítico, no solo posibilitó identificar y sintetizar evidencia empírica relevante, sino también construir marcos conceptuales emergentes y formular propuestas teóricas innovadoras para enfrentar los retos observados (Braun & Clarke, 2021).

La recolección de información abarcó un amplio espectro de fuentes, a partir de la consulta en bases de datos académicas de acceso abierto y especializadas, tal como Web of Science, Scopus, ERIC y Google Scholar, además de repositorios institucionales como arXiv, ResearchGate y Academia.edu. A esto se sumó la revisión de informes provenientes de organismos internacionales (UNESCO, OECD y la Comisión Europea), documentos de políticas institucionales y literatura emergente (como preprints y working papers). La estrategia de búsqueda priorizó estudios, informes técnicos y documentos institucionales publicados a partir de enero de 2023, dada la evolución acelerada del fenómeno, aunque también se consideraron trabajos fundacionales previos que aportan marcos conceptuales esenciales para analizar la integridad académica y la ética en tecnología educativa.

En la fase de recopilación y selección, se empleó una estrategia estructurada que combinó términos como inteligencia artificial generativa, generative artificial intelligence, IA, AI, ChatGPT, LLM, large language models, ética, ethics, integridad académica, academic integrity, educación,

education, conectados por operadores booleanos para optimizar el alcance y la pertinencia de la literatura recuperada. Se establecieron como criterios de inclusión la relevancia temática respecto de la IAGen y la educación superior, abordaje de dimensiones éticas, pedagógicas o institucionales, publicación en español o inglés, disponibilidad de texto completo y estándares metodológicos acordes al tipo de obra. Por el contrario, se excluyeron estudios de índole puramente técnica sin implicaciones educativas, trabajos sin revisión por pares (con la excepción de informes institucionales clave), investigaciones centradas solo en educación básica, y literatura de tipo comercial.

El análisis de la literatura se realizó utilizando principios de análisis temático reflexivo (Braun & Clarke, 2019), permitiendo así interpretar los hallazgos, valorar la calidad y atender las implicaciones de la IAGen en la integridad académica. Este proceso supuso la codificación inicial de conceptos, la agrupación y categorización temática de los materiales, un análisis crítico de la calidad y limitaciones de la evidencia disponible, una síntesis interpretativa, la formulación de marcos conceptuales integrados y, finalmente, el diseño de propuestas teórico-prácticas novedosas. El análisis se estructuró considerando perspectivas del estudiantado, profesorado e instituciones, lo que facilitó la identificación de desafíos, oportunidades y propuestas adaptadas para cada actor, así como una comprensión integral de las dinámicas que configuran la adopción de la IA en educación superior.

Se puso especial atención a investigaciones que aplicaron métodos mixtos, combinando análisis estadísticos, estudios correlacionales y análisis cualitativos temáticos, lo cual permitió una triangulación exhaustiva de datos cuantitativos y cualitativos, enriqueciendo y profundizando la comprensión sobre percepciones, experiencias y prácticas de uso de la IA en contextos universitarios (Creswell & Plano Clark, 2018). Adicionalmente, se integró información actualizada relativa a marcos regulatorios en desarrollo, como el AI Act¹ europeo y directrices de organizaciones internacionales como UNESCO y OECD² que definen categorías de riesgo y principios éticos aplicables al ámbito educativo. Esta dimensión normativa resultó esencial para interpretar tendencias en política educativa y orientar propuestas institucionales.

Finalmente, se reconocen varias limitaciones metodológicas, entre ellas el sesgo temporal, propio de la rápida evolución de la tecnología que puede dejar obsoletos algunos hallazgos; el sesgo de publicación, vinculado a la prevalencia de estudios con resultados llamativos; la heterogeneidad metodológica observada entre los estudios revisados; el sesgo cultural y lingüístico, debido al predominio de literatura en inglés y procedente de contextos anglosajones; y, finalmente, sesgos relacionados con la disponibilidad y acceso a ciertos repositorios. La consideración explícita de estos sesgos es fundamental para contextualizar los hallazgos y reconocer las limitaciones inherentes a cualquier revisión documental sobre un campo tan dinámico y en permanente cambio como la IAGen en la educación universitaria (Petticrew & Roberts, 2006).

LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Este trabajo presenta limitaciones metodológicas y conceptuales que deben ser consideradas al interpretar sus hallazgos y recomendaciones. La naturaleza documental y reflexiva del análisis, sin la incorporación de estudios empíricos propios ni datos de campo provenientes de contextos

1 AI Act es el primer marco jurídico global en materia de IA en todo el mundo. El objetivo de las normas es fomentar una IA fiable en Europa.

2 OECD: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, es una organización internacional de 38 países miembros que buscan promover políticas para mejorar el bienestar económico y social de las personas en todo el mundo.

educativos específicos, constituye una limitación metodológica que puede restringir la posibilidad de validar la aplicabilidad de las propuestas en situaciones reales y diversas. A la vez, la ausencia de investigaciones longitudinales propias que permitan evaluar el impacto sostenido de la IAGen en el desarrollo de competencias académicas y profesionales representa otra limitación importante. Por otro lado, la rápida evolución tecnológica del campo podría implicar que algunos hallazgos pueden volverse obsoletos en períodos relativamente cortos.

El marco conceptual, si bien es robusto en términos teóricos, presenta limitaciones en cuanto a la especificidad práctica de algunas recomendaciones, que carecen de ejemplos concretos o estrategias detalladas para su implementación en distintas disciplinas o contextos institucionales. Esta limitación reduce la utilidad inmediata de las propuestas para implementadores y tomadores de decisiones. A la vez, posibilita posibles líneas de acción.

La revisión de literatura, fundamentada mayormente en fuentes en inglés y contextos anglo-sajones, plantea interrogantes sobre la generalización de los hallazgos a realidades educativas de otras regiones o culturas. Esta limitación geográfica y lingüística puede restringir la aplicabilidad global de las conclusiones y recomendaciones presentadas.

Asimismo, el análisis sobre los sistemas de detección de contenido generado por IA, basado exclusivamente en estudios previos sin experimentación propia ni comparación directa entre herramientas en diferentes idiomas o contextos institucionales, representa una limitación adicional que podría afectar la robustez de las conclusiones en este ámbito específico.

RESULTADOS

El análisis de la literatura revisada revela un contexto complejo, con muchas facetas, sobre la inclusión de IAGen en la educación superior. Los estudios examinados (Cotton et al., 2023; Kasneci et al., 2023; Tlili et al., 2023) convergen en identificar tres fases distintivas en el proceso de integración institucional: una fase inicial de alarma y prohibición (entre noviembre de 2022 y marzo de 2023), una fase de exploración cautelosa (entre abril y agosto de 2023), y una fase emergente de integración estratégica (desde septiembre de 2023 en adelante).

Los trabajos de Lim et al. (2023) revelan que, durante la fase inicial, aproximadamente el 60% de las instituciones de educación superior encuestadas implementaron prohibiciones totales o parciales del uso de herramientas de IAGen, reflejando preocupaciones legítimas sobre la integridad académica y la falta de marcos regulatorios claros. Sin embargo, estudios posteriores (Rudolph et al., 2023; Dwivedi et al., 2023) mostraron que estas prohibiciones resultaron en gran medida ineficaces, dado que el estudiantado continuó utilizando estas herramientas de manera no declarada, generando un clima de clandestinidad que dificulta el desarrollo de prácticas éticas.

Experiencias y percepciones estudiantiles: entre la práctica real y las políticas institucionales

Las investigaciones centradas en las percepciones estudiantiles con relación al uso de IAGen, revelan una brecha significativa entre las políticas institucionales y las prácticas reales de uso. Por otro lado, el estudio de Baidoo-Anu & Owusu Ansah (2023) demuestra que el 78% del alumnado encuestado había utilizado herramientas de IAGen para tareas académicas, pero solo el 34% había recibido orientación institucional clara sobre su uso ético, evidenciando una desconexión crítica entre las necesidades estudiantiles y el apoyo institucional.

Asimismo, los datos analizados por Sok & Heng (2023) identifican cinco categorías principales de uso estudiantil que revelan patrones de apropiación tecnológica diferenciados. La asistencia en la escritura y edición representa el uso más extendido en un 89% de los usuarios participantes del estudio, seguida por la generación y lluvia de ideas con un 67%, la explicación de conceptos complejos con un 54%, la traducción y mejora del lenguaje con un 43%, y la generación de códigos y soluciones técnicas con un 31%. Estos hallazgos sugieren que el estudiantado está utilizando la IAGen principalmente como herramienta de apoyo al proceso de aprendizaje, más que como sustituto del trabajo intelectual.

No obstante, otras investigaciones también revelan preocupaciones éticas significativas que requieren atención institucional urgente. El estudio longitudinal de Perkins (2023) documentó que el 23% del estudiantado participante admitió haber presentado contenido generado por IAGen como trabajo propio sin declaración, y el 45% expresó incertidumbre sobre las normas éticas aplicables al uso de estas herramientas, lo que indica la necesidad apremiante de marcos normativos claros y programas de alfabetización digital.

Un estudio particularmente revelador realizado por Anthropic (2025) sobre el uso de Claude por parte del estudiantado universitario (basado en 574,740 conversaciones académicas reales), proporciona evidencia empírica robusta sobre los patrones de uso en el contexto universitario. Los hallazgos revelan cuatro modalidades principales de interacción estudiantil con la IA: resolución directa de problemas, creación directa de contenidos, resolución colaborativa de problemas y creación colaborativa de contenidos, cada una representando entre 23% y 29% del total de interacciones, lo que sugiere una distribución equilibrada en los tipos de uso que trasciende estereotipos sobre usos exclusivamente instrumentales o creativos.

Es particularmente relevante el fenómeno que el estudio de Anthropic denomina *pirámide cognitiva invertida*, que plantea interrogantes fundamentales sobre el impacto cognitivo de estas herramientas. Los hallazgos revelan que el análisis de las tareas cognitivas, según la taxonomía de Bloom, muestra que gran parte del alumnado delega a la IA principalmente las funciones cognitivas superiores, con un 39.8% de las interacciones orientadas a tareas de creación, 30.2% a análisis, 20.9% a aplicación y comprensión, y apenas 1.8% a memorización. Si bien no es posible hacer generalizaciones definitivas, esta distribución plantea interrogantes sobre si el uso actual de la IAGen está fortaleciendo o debilitando las habilidades cognitivas fundamentales del estudiantado. El estudio también evidencia disparidades significativas en la adopción de la herramienta según el tipo de disciplina académica, sugiriendo que factores como la familiaridad tecnológica y las normas disciplinarias influyen significativamente en los patrones de uso estudiantil.

Miradas del profesorado: de la resistencia a la exploración pedagógica

El análisis de las perspectivas docentes en la revisión de la literatura revela una evolución gradual desde la resistencia inicial hacia la exploración pedagógica estructurada. Los estudios de Cotton et al. (2023) y Eaton (2023) identifican tres perfiles docentes emergentes que reflejan diferentes velocidades de adopción tecnológica: innovadores tempranos (15%), que adoptaron rápidamente herramientas de IAGen en su práctica docente; una mayoría temprana (35%), que comenzó a experimentar con estas herramientas después de recibir formación institucional; y una mayoría tardía (40%), que mantiene una postura cautelosa pero abierta a la integración gradual. El grupo de docentes participante del estudio identifica tanto oportunidades como desafíos significativos en la integración de IAGen en sus prácticas pedagógicas. Entre las oportunidades más valoradas destacan la personalización del feedback (mencionada por el 68% del profesorado encuestado),

la generación de materiales didácticos (56%), el apoyo a estudiantes con diferentes necesidades de aprendizaje (49%), y la automatización de tareas administrativas (43%) (Chassignol et al., 2018; Chen et al., 2020). Estas percepciones positivas sugieren un reconocimiento creciente del potencial transformador de estas tecnologías cuando se integran de manera reflexiva y pedagógicamente fundamentada.

Sin embargo, persisten desafíos sustanciales que requieren atención institucional sistemática. Los estudios identifican preocupaciones centrales como la dificultad para evaluar la originalidad del trabajo estudiantil (78%), la preocupación por la dependencia tecnológica (62%), la falta de formación adecuada (57%), y la incertidumbre sobre las implicaciones éticas (51%) (Bearman et al., 2023). Estas preocupaciones reflejan la necesidad de programas de desarrollo profesional integral que aborden tanto las competencias técnicas como las consideraciones éticas y pedagógicas asociadas al uso de IAGen.

Marcos institucionales y estrategias de implementación

El relevamiento bibliográfico, que permitió indagar sobre las respuestas institucionales, revela una tendencia hacia el desarrollo de marcos regulatorios híbridos que combinan principios éticos, directrices prácticas y mecanismos de apoyo continuo. Las instituciones que han logrado integrar la IAGen de manera exitosa han adoptado enfoques que Holmes & Tuomi (2022) denominan *gobernanza adaptativa*, caracterizada por políticas flexibles que evolucionan con la tecnología y las necesidades emergentes de la comunidad académica.

En este sentido, los marcos institucionales emergentes más efectivos incluyen componentes integrados que abordan múltiples dimensiones del desafío. Estos componentes comprenden una declaración de principios éticos específicos para IA que establece los valores institucionales, directrices claras sobre uso permitido y prohibido que proporcionan orientación práctica, programas de formación continua para docentes y estudiantes que desarrollan competencias necesarias, sistemas de apoyo técnico y pedagógico que facilitan la implementación, y mecanismos de evaluación y actualización continua que aseguran la relevancia y efectividad de las políticas (Tauguiniené et al., 2018; Bretag, 2016).

Evolución hacia nuevos paradigmas de evaluación

La investigación sobre sistemas de detección de contenido generado por IA confirma las limitaciones significativas de los enfoques tecnológicos puros para abordar las complejidades de la integridad académica en la era de la IAGen. Los estudios de Weber-Wulff et al. (2023) y Mitchell et al. (2023) documentan tasas de error del 30-50% en detectores comerciales, con problemas particulares de falsos positivos que afectan de forma desproporcionada a estudiantes no nativos del idioma, evidenciando la inadecuación de soluciones exclusivamente tecnológicas para desafíos fundamentalmente pedagógicos y éticos.

Como alternativa a estos enfoques limitados, emerge el concepto de *evaluación aumentada* propuesto por Sadasivan et al. (2023), que representa un paradigma holístico que combina múltiples fuentes de evidencia para una comprensión más completa del aprendizaje estudiantil. Este enfoque integrado incluye el análisis del proceso de creación, no solo del producto final, permitiendo valorar el desarrollo del pensamiento; la evaluación de competencias metacognitivas y reflexivas que evidencian la conciencia del propio aprendizaje; la valoración de la capacidad de justificación y explicación que demuestra comprensión profunda; la evaluación de habilidades de pensamiento

crítico aplicadas a contextos específicos; y la evaluación de la capacidad de transferencia y aplicación contextual que indica aprendizaje significativo.

La *evaluación aumentada*, como categoría emergente, no solamente aborda las limitaciones de los sistemas de detección tradicionales, sino que también promueve formas más ricas y auténticas de evaluación que reconocen la complejidad del aprendizaje en entornos mediados por tecnología, estableciendo las bases para una transformación más profunda de las prácticas evaluativas en la educación superior.

DISCUSIÓN: HACIA UNA ÉTICA DE LA CO-CREACIÓN

Los hallazgos de esta investigación señalan la necesidad de una reconceptualización de la autoría académica que supere las nociones tradicionales centradas en la autoría individual y se adentre en marcos más complejos y matizados que promuevan una co-creación responsable. Esta transformación no implica abandonar los principios éticos fundamentales, sino más bien su reinterpretación y ampliación para dar respuesta a las nuevas realidades que surgen de la colaboración entre humanos y máquinas (Floridi et al., 2018). Dentro de esta perspectiva, el concepto de *autoría aumentada* emerge como un constructo fundamentado en varios principios interrelacionados: la transparencia, considerada un valor esencial que demanda la declaración explícita del rol que la IAGen desempeña en el proceso creativo; la reflexión metacognitiva, entendida como la capacidad para evaluar críticamente las contribuciones algorítmicas; la responsabilidad editorial, que preserva la autoridad y la rendición de cuentas humanas sobre el contenido final; la adición de un valor distintivo que va más allá de la simple agregación de contenido generado; y la contextualización crítica, que sitúa el uso de la IA dentro de marcos éticos y disciplinarios apropiados.

Esta nueva configuración de la autoría conlleva implicaciones profundas para los sistemas de evaluación académica, especialmente en la educación superior, donde la integración ética de la IAGen requiere una transformación sustancial. Los resultados indican que los enfoques punitivos, centrados únicamente en la detección y sanción, resultan menos eficaces que aquellos que adoptan una perspectiva pedagógica orientada al desarrollo de competencias éticas, críticas y reflexivas (Long & Magerko, 2020). En consonancia con esta línea, la literatura relevante subraya que las nuevas modalidades de evaluación deben ir más allá de valorar exclusivamente el producto final, incorporando la evaluación del proceso de pensamiento, las competencias metacognitivas y reflexivas, la capacidad de síntesis y análisis crítico, así como las habilidades comunicativas y la justificación argumentada. Además, se debe considerar la capacidad para transferir y aplicar el conocimiento en diferentes contextos, favoreciendo así una formación integral.

Por otra parte, el análisis bibliográfico converge en la necesidad de desarrollar marcos que integren competencias éticas complejas, las cuales combinen alfabetización técnica, conciencia crítica y responsabilidad social. Estas competencias deben ser abordadas de modo progresivo y contextualizado, reconociendo que las particularidades de cada disciplina y contexto exigen enfoques diferenciados (UNESCO, 2023). En este sentido, un marco robusto de competencias éticas integradas debe incluir, en primer lugar, una comprensión técnica básica de los sistemas de inteligencia artificial; en segundo lugar, una conciencia crítica que permita identificar sesgos y limitaciones; en tercer lugar, habilidades para la evaluación y verificación rigurosa de resultados; en cuarto lugar, competencias comunicativas y de atribución adecuadas; en quinto lugar, capacidades reflexivas para la toma de decisiones éticas responsables; y finalmente, habilidades orientadas a la colaboración y la co-creación ética.

Desde una perspectiva institucional, las universidades y centros de educación superior enfrentan el desafío de equilibrar la innovación tecnológica con la preservación de los valores académicos esenciales. Los resultados revelan que las instituciones que logran mayor éxito en este balance adoptan enfoques de innovación responsable, caracterizados por combinar la experimentación controlada con procesos sistemáticos de reflexión ética (Ng et al., 2021). Esta aproximación implica varios elementos clave para su implementación efectiva: el desarrollo de políticas adaptativas que evolucionen paralelamente con la tecnología en uso; la inversión en programas de formación continua dirigidos tanto a docentes como a estudiantes; la creación de espacios dedicados a la experimentación y la reflexión crítica; el establecimiento de mecanismos para la evaluación permanente y la retroalimentación rigurosa; y la participación activa en redes de colaboración interinstitucional que faciliten el intercambio de buenas prácticas y el aprendizaje colectivo frente a los retos que plantea la IA en el ámbito académico.

PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES

Los hallazgos de este estudio sugieren algunas consideraciones que requieren atención por parte de los diversos actores del ecosistema de la educación superior. En este contexto, las propuestas para una integración exitosa de la IAGen demandan un enfoque integral y coordinado que trasciende las aproximaciones meramente tecnológicas para atender dimensiones pedagógicas, éticas y organizacionales. La tabla 1 sintetiza las propuestas específicas para cada actor, detallando acciones concretas que pueden guiar la implementación de una cultura de integridad académica en la era de la IA.

Tabla 1. Propuestas y recomendaciones.

Actor	Recomendación	Acción
Instituciones	Desarrollar políticas institucionales adaptativas.	Crear marcos normativos flexibles con principios éticos, directrices de uso y mecanismos de actualización.
	Implementar formación integral en IA.	Ofrecer programas de formación continua en competencias técnicas y éticas para docentes y estudiantes.
	Crear centros de apoyo especializado.	Establecer orientación pedagógica que brinde asesoramiento, recursos y formación sobre la integración ética de la IA.
	Fomentar la investigación institucional.	Realizar investigaciones para evaluar el impacto de la IAGen y usar los hallazgos para la toma de decisiones basada en evidencia.
Profesorado	Rediseñar la evaluación.	Crear actividades que valoren el proceso de pensamiento y la reflexión (elementos metacognitivos), no solo el producto final.
	Modelar el uso ético de la IA.	Ser transparente sobre el uso propio de la IA y compartir abiertamente los procesos de toma de decisiones éticas con los estudiantes.
	Facilitar el diálogo ético.	Crear espacios de debate en clase sobre las implicaciones del uso de la IA, permitiendo a los estudiantes desarrollar su propio marco de referencia.
Estudiantado	Desarrollar alfabetización crítica en IA.	Aprender a evaluar críticamente el contenido generado por IA, verificar la información y reflexionar sobre las implicaciones éticas de su uso.
	Practicar la transparencia.	Adoptar la práctica de declarar de forma explícita cuándo y cómo se utilizan herramientas de IA en los trabajos académicos.
	Cultivar la metacognición.	Desarrollar la capacidad de reflexionar sobre el propio proceso de aprendizaje y cómo la IA contribuye (o no) al desarrollo académico personal.
	Participar en la gobernanza de la IA.	Involucrarse activamente en las discusiones y en la creación de los marcos éticos y las políticas sobre IA de la institución.

Por último, es importante destacar que, esta investigación identificó varias áreas que requieren estudios adicionales para completar la comprensión del fenómeno estudiado. Los estudios longitudinales sobre el impacto de la IA en el desarrollo de competencias académicas y profesionales se presentan como una necesidad. La investigación transcultural que examine cómo diferentes contextos culturales y educativos abordan los desafíos éticos de la IA en educación proporcionará perspectivas valiosas para la generalización de hallazgos. El desarrollo de nuevas herramientas y metodologías para evaluar el aprendizaje en contextos que incorporan IA constituye otro campo prioritario, así como los estudios sobre el impacto de la integración de IA en la preparación del estudiantado para el mundo laboral.

CONCLUSIONES

La integración de la IAGen en ámbitos académicos representa un cambio paradigmático que trasciende dimensiones tecnológicas para adentrarse en cuestiones fundamentales sobre la naturaleza del conocimiento, la creatividad y la autenticidad intelectual. Los hallazgos de este estudio destacan que las estrategias orientadas a la prohibición total o a la adopción acrítica no tienen efectividad para gestionar distintas situaciones que presenta la IAGen en contextos educativos, evidenciando la necesidad de aproximaciones más matizadas y contextualmente sensibles. A la vez, revelan que para una integración exitosa es necesario el desarrollo de marcos éticos que reconozcan la realidad emergente de la colaboración humano-máquina mientras preservan los valores fundamentales de la integridad académica. El concepto de *autoría aumentada* propuesto en este trabajo ofrece un marco conceptual que puede guiar esta transición, enfatizando la transparencia, la reflexión crítica y la responsabilidad intelectual como pilares fundamentales de esta nueva era educativa.

Asimismo, la evidencia analizada sugiere que las instituciones más exitosas en la integración de IAGen han adoptado enfoques de gobernanza adaptativa que combinan principios éticos claros con flexibilidad para evolucionar con los avances tecnológicos. Estos enfoques reconocen que el desarrollo de competencias éticas y digitales tanto en docentes como en estudiantes es fundamental para navegar exitosamente este nuevo ecosistema educativo, requiriendo inversiones sustanciales en desarrollo profesional y curricular.

Las implicaciones de esta investigación se extienden más allá de la gestión tecnológica para incluir la reconceptualización fundamental de procesos de evaluación, la redefinición de competencias académicas y el desarrollo de nuevas formas de literacidad digital que preparen al alumnado para un mundo donde la colaboración humano-máquina será omnipresente. Esta transformación demanda una revisión profunda de las prácticas pedagógicas tradicionales y la adopción de enfoques más holísticos e integradores. Sin embargo, este trabajo también identifica limitaciones significativas en el estado actual del conocimiento, particularmente en lo que respecta a estudios longitudinales sobre el impacto de la IA en el desarrollo de competencias académicas y profesionales. Es necesario abordar estas brechas mientras se desarrollan marcos teóricos y recomendaciones prácticas para la integración ética de la IAGen en la educación superior, priorizando aproximaciones empíricas y contextualizadas.

En última instancia, la transformación que representa la IAGen en la educación superior requiere un compromiso colectivo con la innovación responsable, la reflexión ética continua y la adaptación pedagógica. Solo a través de este compromiso colaborativo entre instituciones, docentes,

estudiantes e investigadores podremos aprovechar el potencial transformador de estas tecnologías mientras preservamos y fortalecemos los valores fundamentales que definen la excelencia académica. La inclusión de la IAGen en la educación superior no constituye meramente una cuestión tecnológica, sino una oportunidad histórica para repensar y fortalecer nuestro compromiso con la integridad, la creatividad y la responsabilidad intelectual en la formación de las próximas generaciones de profesionales y de toda la ciudadanía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBAS, M., JAM, F. A., & KHAN, T. I. (2024). Is it harmful or helpful? Examining the causes and consequences of generative AI usage among university students. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 21(1), 10. DOI: dx.doi.org/10.1186/s41239-024-00444-7
- ALAFNAN, M. A., SAMIRA DISHARI, MARINA JOVIC, & KOBA LOMIDZE. (2023). ChatGPT as an Educational Tool: Opportunities, Challenges, and Recommendations for Communication, Business Writing, and Composition Courses. *Journal of Artificial Intelligence and Technology*, 3(2), 60–68. <https://doi.org/10.37965/jait.2023.0184>
- BAIDOO-ANU, D., OWUSU ANSAH, L. (2023). Education in the Era of Generative Artificial Intelligence (AI): Understanding the Potential Benefits of ChatGPT in Promoting Teaching and Learning. *Journal of AI*. 7(1), 52-62. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4337484>
- BEARMAN, M., RYAN, J., & AJJAWI, R. (2023). Discourses of artificial intelligence in higher education: A critical literature review. *Higher Education*, 86(2), 369-385. <https://doi.org/10.1007/s10734-022-00937-2>
- BORJI, A. (2023). A categorical archive of ChatGPT failures. *arXiv preprint arXiv:2302.03494*.
- BRAUN, V., & CLARKE, V. (2019). Reflecting on reflexive thematic analysis. *Qualitative Research in Sport, Exercise and Health*, 11(4), 589–597. <https://doi.org/10.1080/2159676X.2019.1628806>
- BRAUN, V., & CLARKE, V. (2019). To saturate or not to saturate? Questioning data saturation as a useful concept for thematic analysis and sample-size rationales. *Qualitative Research in Sport, Exercise and Health*, 13(2), 201–216. <https://doi.org/10.1080/2159676X.2019.1704846>
- BRETAG, T. (2016). *Handbook of academic integrity*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-287-098-8>
- CHASSIGNOL, M., KHOROSHAVIN, A., KLIMOVA, A., & BILYATDINOVA, A. (2018). Artificial intelligence trends in education: A narrative overview. *Procedia Computer Science*, 136, 16-24. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.08.233>
- CHEN, L., CHEN, P., & LIN, Z. (2020). Artificial intelligence in education: A review. *IEEE Access*, 8, 75264-75278. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988510>.
- COTTON, D., COTTON, P., & SHIPWAY, J. R. (2023). Chatting and Cheating. Ensuring academic integrity in the era of ChatGPT. <https://doi.org/10.1080/14703297.2023.2190148>
- CRESWELL, J. W., & PLANO CLARK, V. L. (2018). *Designing and conducting mixed methods research*. Sage Publications. <https://doi.org/10.1016/j.lisr.2007.02.003>

- DWIVEDI, Y. K., KSHETRI, N., HUGHES, L., SLADE, E. L., JEYARAJ, A., KAR, A. K., ... & WRIGHT, R. (2023). Opinion Paper: "So what if ChatGPT wrote it?" Multidisciplinary perspectives on opportunities, challenges and implications of generative conversational AI for research, practice and policy. *International Journal of Information Management*, 71, 102642. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2023.102642>
- EATON, S. E. (2023). Academic integrity in the age of artificial intelligence (AI) authoring apps: Is the 'write' still 'right'? *Journal of Academic Ethics*, 21(1), 97-115. <https://doi.org/10.1002/tesj.716>
- FISHMAN, T. (2014). The fundamental values of academic integrity. International Center for Academic Integrity. https://www.chapman.edu/academics/academic-integrity/_files/the-fundamental-values-of-academic-integrity.pdf
- EL KHATAT, A.M., ELSAID, K. & ALMEER, S. (2023). Evaluating the efficacy of AI content detection tools in differentiating between human and AI-generated text. *Int J Educ Integr* 19, 17 <https://doi.org/10.1007/s40979-023-00140-5>
- FLORIDI, L., COWLS, J., BELTRAMETTI, M., CHATILA, R., CHAZERAND, P., Dignum, V., ... & VAYENA, E. (2018). AI4People—an ethical framework for a good AI society: Opportunities, risks, principles, and recommendations. *Minds and Machines*, 28(4), 689-707. <https://doi.org/10.1007/s11023-018-9482-5>
- GALLI, M. G., & KANOBEL, M. C. (2023). ChatGPT en Educación Superior: explorando sus potencialidades y sus limitaciones. *Revista Educación Superior Y Sociedad (ESS)*, 35(2), 174-195. <https://doi.org/10.54674/ess.v35i2.815>
- GALLENT TORRES, C., ZAPATA GONZÁLEZ, A., & ORTEGO HERNANDO, J. L. (2023). El impacto de la inteligencia artificial generativa en educación superior: una mirada desde la ética y la integridad académica. *RELIEVE - Revista Electrónica De Investigación Y Evaluación Educativa*, 29(2). <https://doi.org/10.30827/relieve.v29i2.29134>
- GOUGH, D., OLIVER, S., & THOMAS, J. (2017). An introduction to systematic reviews. Sage Publications.
- HERRERA ROMERO, L. D. (2025). Más Allá del Fantasma en la Máquina: Coautoría humano-IA en arte digital perspectiva sociotécnica e implicaciones educativas universitarias. *Nuevo Itinerario*, 21(1), 1-18. <https://doi.org/10.30972/nvt.2118424>
- HOLMES, W., & TUOMI, I. (2022). State of the art and practice in AI in education. *European Journal of Education*, 57(4), 542-570. <https://doi.org/10.1111/ejed.12533>
- JI, Z., LEE, N., FRIESKE, R., YU, T., SU, D., XU, Y., ... & FUNG, P. (2023). Survey of hallucination in natural language generation. *ACM Computing Surveys*, 55(12), 1-38. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.03629>
- KASNECI, E., SESSLER, K., KÜCHEMANN, S., BANNERT, M., DEMENTIEVA, D., FISCHER, F., ... & KASNECI, G. (2023). ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. *Learning and Individual Differences*, 103, 102274. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2023.102274>

LIM, W. M., GUNASEKARA, A., PALLANT, J. L., PALLANT, J. I., & PECHENKINA, E. (2023). Generative AI and the future of education: Ragnarök or reformation? A paradoxical perspective from management educators. *The International Journal of Management Education*, 21(2), 100790. <https://doi.org/10.1016/j.ijme.2023.100790>

LONG, D., & MAGERKO, B. (2020). What is AI literacy? Competencies and design considerations. *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-16. <https://aiunplugged.lmc.gatech.edu/wp-content/uploads/sites/36/2020/08/CHI-2020-AI-Literacy-Paper-Camera-Ready.pdf>

MITCHELL, E., LEE, Y., KHAZATSKY, A., MANNING, C. D., & FINN, C. (2023). DetectGPT: Zero-shot machine-generated text detection using probability curvature. *Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning*, 24950-24962.

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.11305>

NG, D. T. K., LEUNG, J. K. L., CHU, K. W. S., & QIAO, M. S. (2021). AI literacy: Definition, teaching, evaluation and ethical issues. *Proceedings of the Association for Information Science and Technology*, 58(1), 504-509. <https://doi.org/10.1002/pra2.487>

PERKINS, M. (2023). Academic integrity considerations of AI large language models in the post-pandemic era: ChatGPT and beyond. *Journal of University Teaching & Learning Practice*, 20(2), 07. <https://doi.org/10.53761/1.20.02.07>

PETTICREW, M., & ROBERTS, H. (2006). Systematic reviews in the social sciences: A practical guide. Blackwell Publishing. <https://bit.ly/4omsjYT>

REDECKER, C., & PUNIE, Y. (2017). European framework for the digital competence of educators: DigCompEdu, (Y..Punie,editor) Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/159770>

RUDOLPH, J., TAN, S., & TAN, S. (2023). War of the chatbots: Bard, Bing Chat, ChatGPT, Ernie and beyond. The new AI gold rush and its impact on higher education. *Journal of Applied Learning and Teaching*, 6(1), 364-389. <https://doi.org/10.37074/jalt.2023.6.1.23>

SADASIVAN, V. S., KUMAR, A., BALASUBRAMANIAN, S., WANG, W., & FEIZI, S. (2023). Can AI-generated text be reliably detected? arXiv preprint arXiv:2303.11156.

SOK, S., & HENG, K. (2023). ChatGPT for education and research: A review of benefits and risks. *Cambodian Journal of Educational Research*, 3(1), 110-121. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4378735>

STOKEL-WALKER, C. (2022). AI bot ChatGPT writes smart essays—should professors worry? *Nature*, 613(7944), 422-423. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-04397-7>

Sullivan, M., Kelly, A., & McLaughlan, P. (2023). ChatGPT in higher education: Considerations for academic integrity and student learning. *Journal of Applied Learning and Teaching*, 6(1), 31-40. <https://doi.org/10.37074/jalt.2023.6.1.17>

TAUGINIENĖ, L., BUTKEVIČIENĖ, E., VOHLE, F., ODINECA, T., REA, S., JASZCZOLT, J.& GAIŽAUSKAITĖ, I. (2018). General guidelines for academic integrity. ENAI Report. <https://bit.ly/4les3sa>

TLILI, A., SHEHATA, B., ADARKWAH, M. A., BOZKURT, A., HICKEY, D. T., HUANG, R., & AGYEMANG, B. (2023). What if the devil is my guardian angel: ChatGPT as a case study of using chatbots in education. *Smart Learning Environments*, 10(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s40561-023-00237-x>

UNESCO. (2023). ChatGPT and artificial intelligence in higher education: Quick start guide. UNESCO. <https://bit.ly/46DKN0A>

WEBER-WULFF, D., ANOHINA-NAUMECA, A., BJELOBABA, S., FOLTÝNEK, T., GUERRERODIB, J., POPOOLA, O., ... & WADDINGTON, L. (2023). Testing of detection tools for AI-generated text. *International Journal for Educational Integrity*, 19(1), 26. <https://doi.org/10.1007/s40979-023-00146-z>

ZAWACKI-RICHTER, O., MARÍN, V. I., BOND, M., & GOUVERNEUR, F. (2019). Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education—where are the educators? *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 16(1), 39. <https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0>

ZHAI, X. (2022). ChatGPT user experience: Implications for education. *SSRN Electronic Journal*, 1-23. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4312418>

PATRÓN DE FRECUENCIA BASADO EN EL CONTROL DE UN OSCILADOR MEDIANTE MEJORAS DE LA MEDICIÓN ADAPTATIVA REFERENCIADA POR GPS

Diego Adán Scharf*, Marcelo Daniel Leo, Luis Napolitano.

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Avellaneda, Departamento de Electrónica, Laboratorio de Investigación Aplicada, Av. Ramón Franco 5050, Avellaneda, Buenos Aires, Argentina.

*Autor a quien la correspondencia debe ser dirigida: lefra@fra.utn.edu.ar

RESUMEN

Se presenta el desarrollo de un algoritmo novedoso que combina un método de medición adaptativo de frecuencia con un procedimiento basado en el control de la misma, aplicado a un lazo de estabilización de un sistema de referencia de frecuencia. A diferencia de los métodos convencionales, basados en lazos enganchados en fase, se emplean señales de bajo contenido espectral indeseado, lográndose de este modo, una virtual eliminación del ruido de fase y una mejora significativa de la estabilidad y de la precisión.

Se implementó el algoritmo desarrollado en un sistema que incluyó, microcontroladores, un oscilador controlado por tensión estabilizado térmicamente y un módulo que disciplina a la estructura mediante el sistema de posicionamiento global (GPS). Se diseñó, construyó y evaluó un prototipo funcional de laboratorio que permitió avalar el sistema desarrollado, a partir de mediciones certificadas en el INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial).

Palabras Clave: Patrón frecuencial, control adaptativo, referencia de frecuencia, lazo enganchado en fase.

ABSTRACT

The development of a novel algorithm that combines an adaptive frequency measurement method with a frequency control-based procedure is presented, applied to a stabilization loop of a frequency reference system. Unlike conventional methods based on phase-locked loops, signals with low unwanted spectral content are used, thereby achieving virtual elimination of phase noise and significantly improving stability and accuracy. The developed algorithm was implemented in a system that included microcontrollers, a thermally stabilized voltage-controlled oscillator, and a module that disciplines the structure using the global positioning system (GPS). A functional laboratory prototype was designed, built, and evaluated, enabling the developed system to be validated based on measurements certified at the National Institute of Industrial Technology (INTI).

Key Words: Frequency pattern, adaptive control, frequency reference, phase-locked loop.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas que proveen referencias de frecuencias determinan la precisión temporal de las estructuras en donde son empleados; aplicaciones típicas son, los frecuencímetros, generadores de señales, etc.

Los métodos más económicos en los que se basan estos sistemas referenciales utilizan relojes a cristal de cuarzo, que si se operan en una cámara térmica, se mejora la estabilidad en temperatura y se logra de este modo, una mejor consistencia en la frecuencia. En sistemas donde se requiere una mejor estabilidad en el tiempo, se recurre a relojes atómicos, por ejemplo, los basados en Rubidio, que son considerados como un patrón de frecuencia secundario; o mejor aún, los basados en Cesio (D.B. Sullivan et al., 1990), considerado como patrón primario ya que, en su empleo, se basa la definición actual del segundo. Otra alternativa es la utilización de osciladores locales a cristal, disciplinados mediante una referencia de mejor estabilidad, derivada de las señales emitidas por los satélites de posicionamiento global (GPS) (Judah Levine, 2002; Terje Johnsen, 2002). Este sistema, denominado GPSDO (Xiang Yu et al., 2009), constituye la tecnología de punta hacia la cual están migrando los laboratorios de calibración (Michael A. Lombardi, 1999; Michael A. Lombardi et al., 2001; Michael A. Lombardi, 2008).

A diferencia de los GPSDO convencionales, que utilizan la comparación de fase y su filtrado para generar la señal de error y así controlar la tensión del oscilador, el sistema desarrollado realiza una comparación de las frecuencias entre, el oscilador a estabilizar y una referencia proveniente de un GPS. Este tipo de comparación, a diferencia de la convencional, genera señales de error a una tasa muy diferente, de frecuencia significativamente más lenta; lo que produce una modulación despreciable en la frecuencia del oscilador, sin agregar ruido de fase mensurable al mismo.

Otro aspecto tiene que ver con la medición de frecuencia, que normalmente se realiza contando los ciclos de la señal del oscilador, en la ventana de tiempo determinada por la señal de un pulso por segundo (referencia); sin embargo, existe una técnica empleada por algunos frecuencímetros modernos (Pendulum CNT-90, 2013) que permite utilizar mediciones continuas (Staffan Johansson, 2006), sin ventanas de medición o puntos de inicio y finalización. Esta medición adaptativa de la frecuencia se basa en variar dinámicamente el período de la medición, según sea el error detectado.

Implementando el concepto de medición adaptativa en el GPSDO desarrollado, a medida que se logra la estabilización del lazo de control del oscilador, disminuye el error, por lo que el tiempo de medición aumenta y por ende se logran detectar errores cada vez más pequeños. Todo esto se realiza, sin embargo, una vez por segundo, acumulando los pulsos ingresados, sin generar un punto de inicio de cuenta y uno de finalización (no existe una ventana de medición como utilizan los sistemas convencionales). De este modo, la estructura desarrollada mejora la detección de cambios en el lazo de control, aun cuando el sistema se encuentre en un punto muy estable y a diferencia de los mecanismos convencionales, se reduce significativamente el período de medición, evitando así, retrasar la corrección.

Por otro lado, la referencia “superior”, no necesariamente debe estar libre de ruido de fase, pues el algoritmo desarrollado, al no controlar un lazo enganchado en fase, sino en frecuencia, permite un control del sistema en forma más inteligente, evitando las correcciones bruscas de la frecuencia de salida, con la virtual eliminación del ruido de fase.

DESARROLLO

Descripción del funcionamiento del sistema

Para la medición de la frecuencia del sistema, se utilizó como patrón de referencia, la señal de un pulso por segundo que proveen los receptores de GPS y que es decodificada de las transmisiones de satélites actualmente utilizados en los sistemas de posicionamiento global. Dicha señal deriva de los relojes atómicos de los satélites, los cuales, además son corregidos periódicamente respecto a la hora UTC (tiempo universal coordinado).

La medición adaptativa de la frecuencia del oscilador local a controlar (F_m), se realizó utilizando una cantidad (n) de períodos (T) de la señal utilizada como patrón (F_r); en donde n es variable en función del error acumulado en un contador de ciclos del oscilador local (C_p), respecto del valor ideal esperado para dicha cantidad de períodos acumulados (ecuación 1). De esta forma, es posible determinar la cantidad (P_e) de ciclos en exceso o defecto que fueron acumulados en el contador, respecto de la cantidad esperada y de esa forma, determinar el error que tiene esa señal. El contador acumula todos los pulsos de la señal a controlar, así como también, se acumula la cantidad de períodos T de la señal patrón.

$$\sum_{T=1}^{T=n} C_p(T) = \text{Total_de_ciclos_acumulados} \quad (1)$$

Tal como se observa en la ecuación 2, si la cantidad de pulsos de señal acumulados, es igual al número de períodos T multiplicado por la frecuencia esperada F_r , el sistema no detectará diferencia entre la frecuencia de la señal a medir y la considerada como referencia.

$$C_p(T) = T.F_r \Rightarrow \text{no_se_detecta_la_diferencia} \quad (2)$$

Cabe destacar que al implementar el sistema mediante contadores digitales, los flancos de señal son los que habilitan el conteo. En un frecuencímetro tradicional, este hecho introduce un error de conteo de un ciclo (+ - 1); sin embargo, al utilizar un contador acumulativo que considera todos los pulsos que ingresan, dicho error desaparece, pues la fracción del ciclo que no es detectada en un período de medición T , se acumula hasta que el flanco es detectado dentro de uno de los períodos de la señal patrón y por ende acumulado en el contador. En este caso, la señal acumulada diferiría respecto del valor esperado en +1 cuenta, y no se cumpliría la ecuación 3, correspondiente a una medición estable de la frecuencia.

$$-1 < \sum_{T=1}^{T=n} (C_p(T) - T.F_r) < 1 \quad (3)$$

El período de la señal de un pulso por segundo de los módulos receptores de GPS, posee la característica de presentar variaciones en el flanco de la señal de aprox. + - 30nS (figura 1). Este “error”, al acumularse en el tiempo, tiende a disminuir su magnitud, lo que hace posible su utilización como referencia en mediciones de tiempo y frecuencia de largo plazo.

En el caso que los flancos de conteo de ambas señales se encuentran en fase o cercano a ello, la incertidumbre mencionada de 30nS puede provocar que, durante un período T se contabilice un ciclo menos y al siguiente período un ciclo más; esto es debido al propio “Jitter” del flanco de la señal de referencia del GPS (figura 2); luego, el algoritmo detectaría una parte de error en más o en

menos, sin que necesariamente la señal a medir haya aumentado o disminuido su frecuencia. Esta variación del flanco tiende a compensarse (estadísticamente), entonces, si en un período se contabiliza un ciclo de menos, en el siguiente aparecería el ciclo que no entró en el período anterior, haciendo que, luego de dos períodos T , la sumatoria del contador C_p no refleje esas partes de error.

Es por esto que el acumulador total de pulsos (ecuación 3), debe admitir que el resultado parcial pueda ser también igual a +1 cuenta, (ecuación 4)

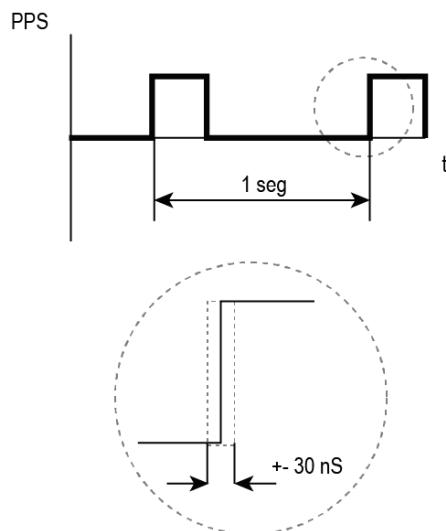


Figura 1. Variaciones en los módulos receptores de GPS.

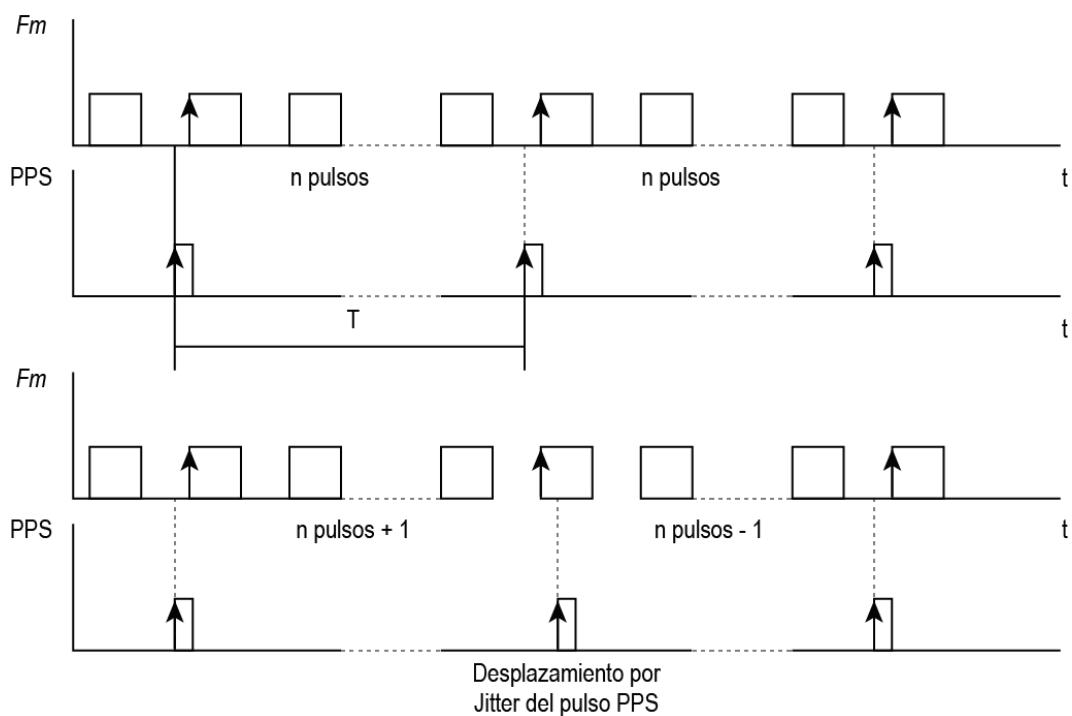


Figura 2. Incertidumbre de conteo.

$$-1 \leq \sum_{T=1}^{T=n} (Cp(T) - T.Fr) \leq 1 \quad (4)$$

Puede inferirse que, cuando en la sumatoria se detecta más de una parte de error por exceso o defecto, se establece una tendencia. Si las partes de error acumuladas son positivas, por ejemplo 2 (partes), significa que la señal a medir Fm tiene una frecuencia mayor que la usada como referencia (Fr) en una cantidad de 2 ciclos Pe (en "T.Fr"); por el contrario, si las partes acumuladas son 3 negativas, la señal Fm tiene una frecuencia menor que Fr en 3 ciclos (ecuación 5).

$$\frac{Pe}{T.Fr} = \text{Partes de error en la relación a la cantidad de ciclos de referencia} \quad (5)$$

La ecuación 6 presenta un ejemplo donde Fr = 10Mhz, con detección de 2 partes de error en 8 períodos T de 1 segundo.

$$\frac{Pe}{T.Fr} = \frac{2}{8.10^7} = 2.5.10^{-9} \quad (6)$$

Al obtenerse una dimensión del error de la señal medida Fm, respecto de la teórica esperada Fr, se tiene una información proporcional al apartamiento de la señal a controlar, respecto del valor esperado. Luego, es posible establecer un factor de corrección directamente proporcional a las partes de error detectadas (Pe), e inversamente proporcional al período T en que dichas partes fueron registradas. Este factor (ecuación 7), procesado adecuadamente por el algoritmo, actúa sobre la señal que controla al oscilador local como una realimentación negativa, modificando así la frecuencia del mismo, para disminuir las partes de error detectadas. Así, cuanto mayor es el error detectado, el algoritmo generará una señal proporcionalmente más grande, para lograr consecuentemente, un corrimiento más rápido del oscilador controlado, llevándolo al valor teórico esperado con errores cada vez más chicos (lo que genera a su vez, señales de error cada vez más chicas).

$$\frac{Pe}{T} = \text{Factor de corrección} \quad (7)$$

Funcionamiento del circuito

Para la implementación del sistema desarrollado, se utilizó un microcontrolador como interfaz general entre los diferentes módulos.

En la puesta en marcha, el microcontrolador envía primeramente señales de "reset" al módulo GPS y a la pantalla digital. A continuación, son leídos de una memoria no volátil los valores de estabilización del lazo obtenidos durante el último uso. Esto permite iniciar la tensión de control del lazo en un valor donde el mismo ya estuvo estabilizado (teniendo en cuenta la temperatura), pues de esa forma, se alcanza más rápidamente la estabilización. Posteriormente se carga este valor inicial al conversor digital – analógico (DAC) y el sistema comienza a leer la señal de un pulso por segundo (1 PPS, marcador de tiempo en la rutina de software).

Comienza entonces un periodo de calentamiento (warm-up) a la espera de la confirmación, por parte del módulo GPS, de que la posición y hora han sido fijadas y en consecuencia, el período de la señal de 1PPS puede considerarse alineado con el tiempo UTC y por lo tanto, el sistema puede utilizarlo como referencia para la medición de frecuencia.

A continuación, se comienza a medir la frecuencia del oscilador mediante el algoritmo adaptativo, ejecutándose diferentes subrutinas según sea el apartamiento que tenga la señal respecto de

la referencia. Luego, según el factor de corrección calculado por el microcontrolador, se computa y modifica el valor adecuado de carga del DAC, lográndose de este modo, una optimización progresiva de la frecuencia del oscilador, respecto de la considerada como referencia.

Por otro lado, durante los períodos libres de procesos críticos (como la rutina de conteo), son actualizados los valores de la pantalla, leídos los comandos de entrada y volcado del estado del sistema al bus RS232 para su visualización en una PC (si fuera necesario).

En la figura 3 puede observarse, mediante un diagrama de flujo, la lógica de funcionamiento del sistema; mientras que la figura 4 presenta, el diagrama en bloques correspondiente al prototípico desarrollado.

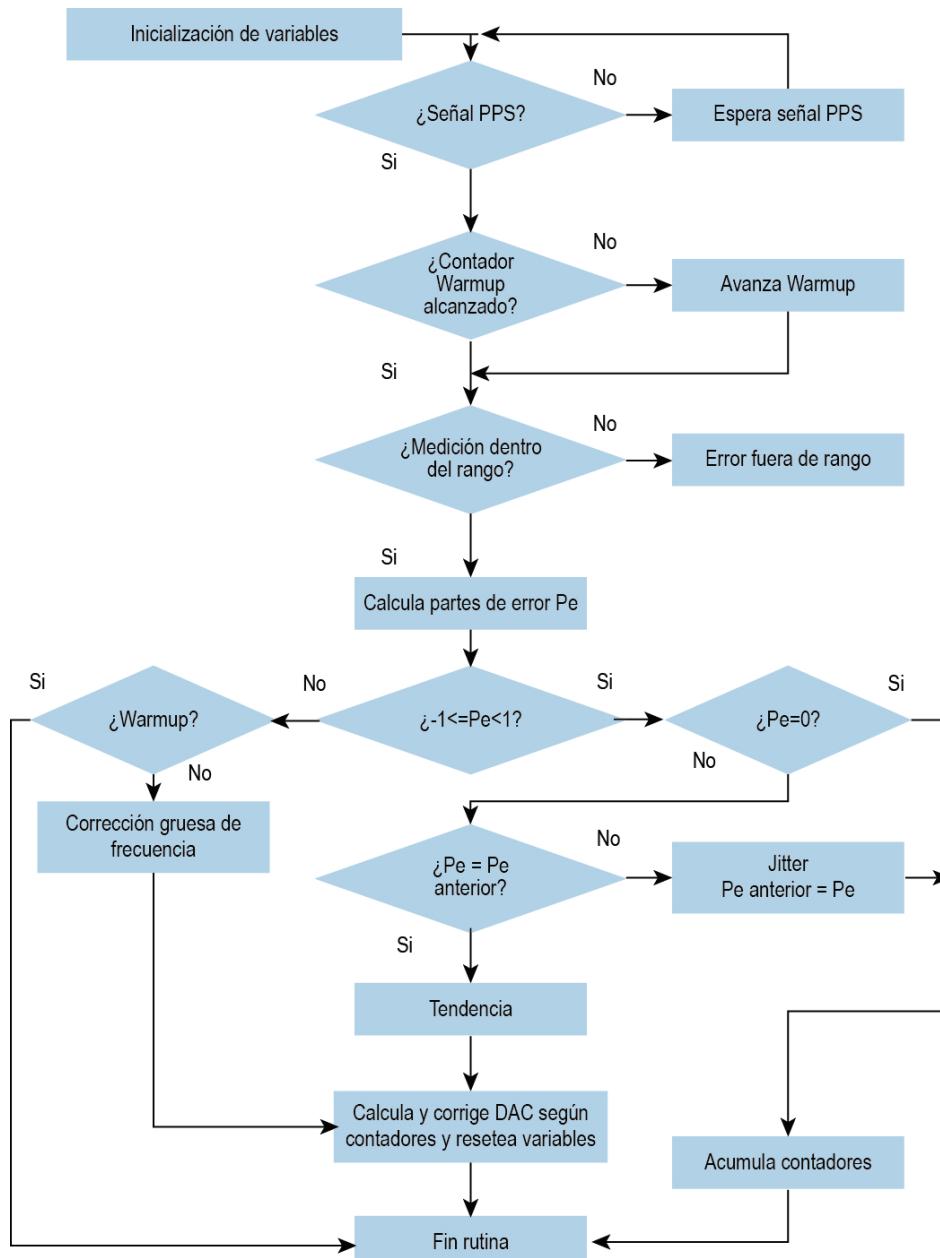


Figura 3. Funcionamiento.

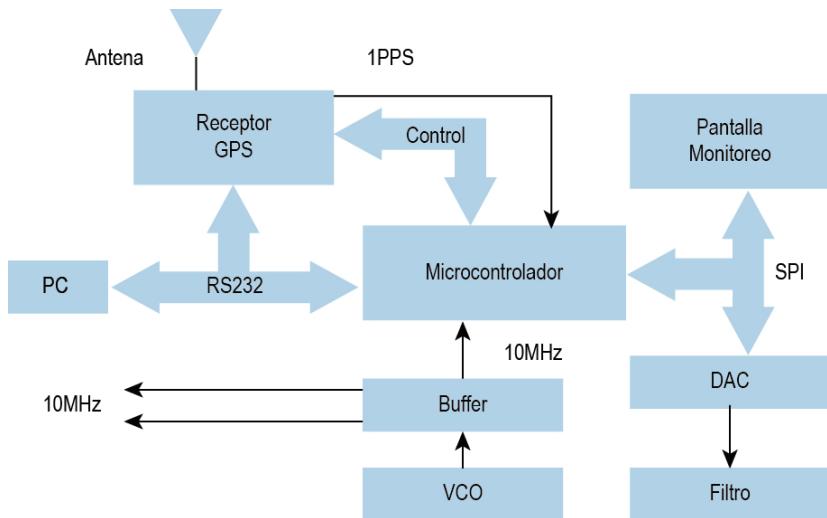


Figura 4. Diagrama en bloques del prototipo

Descripción de las partes del circuito

A continuación se detallan los módulos y partes constitutivas empleadas.

Microcontrolador

Se utilizó un C8051F561, derivado del 8051, con recursos mejorados y contador PCA de alta velocidad, para la captura de la señal del oscilador a medir y controlar. Este microcontrolador posee varias interfaces que permiten su comunicación con diversos módulos; tiene una interfaz de programación y depuración que permite, mediante la IDE utilizada, la programación y depurado del algoritmo desarrollado.

Módulo “GPS”

Se utilizó un módulo Connor Winfield WI125, receptor de GPS, con salida de 1PPS y 10Mhz, sincronizados con UTC. El mismo posee salidas de datos NMEA, lo que posibilita su control y monitoreo. Mediante una batería externa, se permiten almacenar datos para lograr un arranque más rápido y poder asegurar la posición y tiempo y por ende, la alineación del pulso PPS con UTC, asegurando anticipadamente una referencia de tiempo adecuada para comenzar la comparación de frecuencias.

Módulo oscilador

Se trata de un módulo oscilador a cristal OH200 de Connor Winfield, estabilizado térmicamente y controlado mediante tensión. Posee una estabilidad en frecuencia de +5 ppb, que lo hace muy estable naturalmente. Esta elección permite partir de un oscilador con bajo ruido de fase, que luego se controla mediante el lazo de comparación de frecuencia. Adicionalmente, se colocó un sistema de monitoreo de la temperatura junto a este módulo para determinar cuando el mismo alcanza el régimen normal de funcionamiento.

Circuito de control de VCO

Conformado por una referencia de tensión, un filtro pasa bajos y un conversor DAC de 16 bits e interfaz SPI, genera la señal de control del VCO para modificar la frecuencia del mismo de acuerdo

al resultado del algoritmo de procesamiento del factor de corrección. Se diseñó el circuito para tener baja incidencia del ruido eléctrico y lograr que la señal generada no provoque un incremento del ruido de fase en el oscilador.

Interfaz de entrada

Se utilizó una pantalla digital con interfaz SPI y botones de control. En la pantalla se muestra el estado del lazo, la fijación del GPS y la información sobre los cálculos realizados durante la medición adaptativa de frecuencia.

Prototipo construido

La implementación del sistema desarrollado se llevó a cabo mediante el soporte en una placa PCB, diseñada para interconectar todos los módulos mencionados (figura 5).



Figura 5. Placa prototipo

En la figura 6 puede observarse el interior del prototipo definitivo; se aprecia la cámara térmica que aumenta la estabilidad del sistema y los cables con sus conectores correspondientes.



Figura 6. Interior del equipo

La figura 7 presenta el frente del equipo; allí se observa la pantalla, que provee la información principal del estado del sistema al usuario.



Figura 7. Frente del equipo

RESULTADOS

Mediante el algoritmo desarrollado, pueden obtenerse las partes de error de la señal del oscilador, respecto de la referencia calculada en base a la señal PPS. Esto permite tener en todo momento, el máximo error instantáneo de la frecuencia medida. Luego, el error real sería menor que este valor máximo. La figura 8 muestra la secuencia de arranque del prototipo.

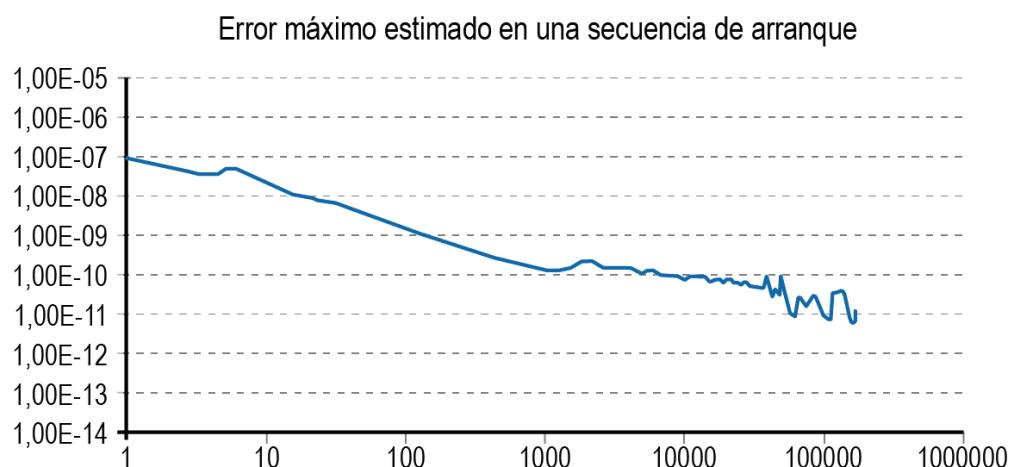
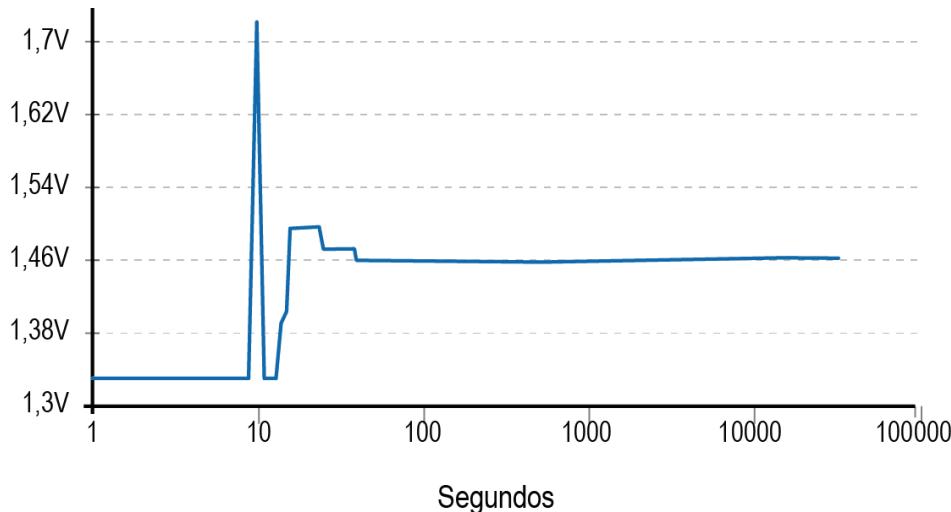


Figura 8. Error máximo estimado en una secuencia de arranque.

Además, se realizaron ensayos del tiempo de estabilización del lazo de control midiendo la tensión generada por el DAC, lográndose valores del orden de los 30 segundos (luego de asegurada la señal de PPS) (figura 9).



Certificado de Calibración / Medición

Se solicitó al Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) un certificado de calibración / medición del equipo, obteniéndose los resultados que a continuación se detallan.

Metodología empleada

El instrumento fue calibrado según el Procedimiento PEOD62 – “Calibración de Osciladores, Contadores y Frecuencímetros”.

De acuerdo con este procedimiento, se midió la frecuencia generada por el instrumento bajo calibración conectando el terminal de salida del mismo a la entrada del contador de frecuencia utilizado como referencia (Figura 10).

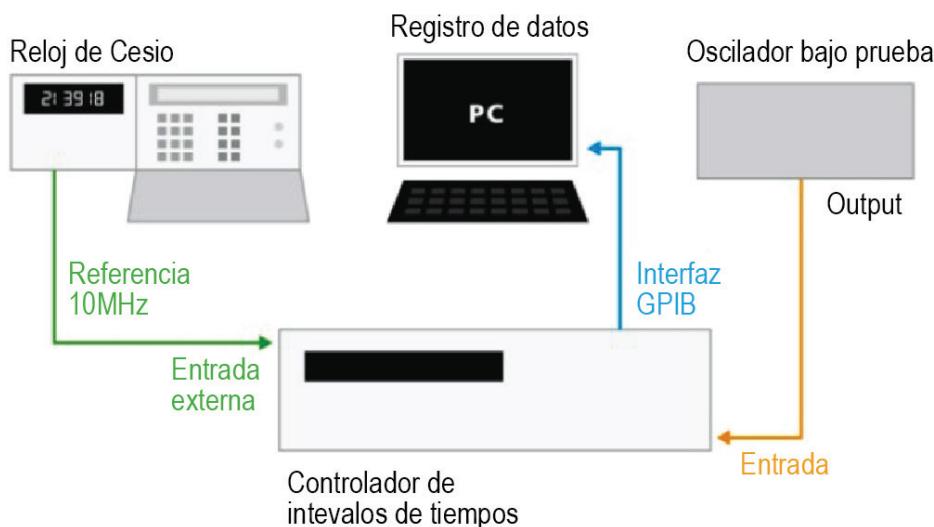


Figura 10. Diagrama de conexionado.

Los valores que se informan en el presente certificado están referidos a la frecuencia de salida mencionada y han sido adquiridos en forma automática mediante el empleo de un software adecuado. De este modo, se realizaron mediciones de frecuencia por espacio de 24 horas, registrándose datos con un tiempo de promediación (τ) de 1 segundo.

Resultados

Los resultados mostrados en este certificado de calibración son trazables al Patrón de Tiempo del INTI, reloj denominado INTI-Cs1.

La tabla 1 presenta el Desvío de Allan, que expresa la estabilidad en frecuencia, en función del período de promediado τ .

τ / s	$\sigma \text{ y } \tau$
1	8×10^{-12}
2	9×10^{-12}
4	1×10^{-12}
8	1×10^{-12}
16	1×10^{-12}
31	1×10^{-12}
64	1×10^{-12}
128	8×10^{-12}
256	6×10^{-12}
512	5×10^{-12}
1024	6×10^{-12}
2048	7×10^{-12}

Tabla 1. Desvío de Allan

El valor medido de la frecuencia promedio es de 9 999 999,9999 ($1 \pm u(\tau)$) Hz.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un algoritmo original, orientado específicamente a la medición de frecuencia mediante la comparación con una referencia conocida, en un tiempo de medición adaptativo.

Se implementó un método que, a partir de la medición de la frecuencia de un oscilador controlado por tensión, posibilitó que un lazo de control desarrollado realice el ajuste automático de la frecuencia de dicho oscilador, hasta disminuir su error y aproximarla a la referencia utilizada.

Se construyó un prototipo funcional, con todos los elementos necesarios para evaluar y probar el desarrollo.

Dado que el sistema de control desarrollado ejerce sobre el oscilador un control significativamente lento (en promedio y con el lazo estabilizado se obtuvieron variaciones en la tensión de control cada 2500 segundos), puede inferirse que el ruido de fase de la señal, es aproximadamente igual al valor declarado por el fabricante del módulo oscilador, es decir -115dBc/Hz.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- D.B. Sullivan, D.W. Allan, D.A. Howe, F.L. Walls, "Characterization of Clocks and Oscillators", Time and Frequency Division, Center for Atomic, Molecular, and Optical Physics, National Measurement Laboratory, National Institute of Standards and Technology, 1990.
- Michael A. Lombardi, "The Use of GPS Disciplined Oscillators as Primary Frequency Standards for Calibration and Metrology Laboratories", Measure: Journal of Measurement Science, September 2008, pp. 56-65.
- Michael A. Lombardi, Lisa M. Nelson, Andrew N. Novick, Victor S. Zhang, "Time and Frequency Measurements using the Global Positioning System (GPS)", Cal Lab Int. Jour. of Metrology, July-September 2001, pp. 26-33.
- Michael A. Lombardi, "Traceability in Time and Frequency Metrology", Cal Lab Int. Jour. of Metrology, September-October 1999, pp. 33-40
- D.B. Sullivan, D.W. Allan, D.A. Howe, F.L. Walls, "Characterization of Clocks and Oscillators", Time and Frequency Division, Center for Atomic, Molecular, and Optical Physics, National Measurement Laboratory, National Institute of Standards and Technology, 1990.
- Judah Levine, "Time and frequency distribution using satellites", Time and Frequency Division and JILA, National Institute of Standards and Technology, 2002.
- Xiang Yu, Hua Yu, Guo Wei, Zhang Wei, "A New Method for the Design of Digital Disciplined" IEEE, 2009.
- Terje Johnsen, "Time and Frequency Synchronization in Multistatic Radar", IEEE, 2002.
- Spectracom Pendulum Instruments, "CNT-90 Timer/Counter/Analyzer", Spectracomcorp, 2013
- Staffan Johansson, "New frequency counting principle improves resolution". IEEE, 2006

ACTIVIDADES CURRICULARES EN ENTORNOS DIGITALES: DICTADO BIMODAL DE LA ASIGNATURA INGENIERÍA Y SOCIEDAD EN UTN

Karina Cecilia Ferrando^{*1}, Julieta Rozenhauz², Nora Dari³, Rafael Omar Cura⁴,
Olga Haydée Páez⁵

^{1, 2, 3, 5} Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Avellaneda, Ramón Franco 5050 (1878) Villa Domínico, Provincia de Buenos Aires, República Argentina.

⁴ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca, 11 de Abril 461 (8000) Bahía Blanca, Provincia de Buenos Aires, República Argentina

**Autor a quien la correspondencia debe ser dirigida: kferrando@fra.utn.edu.ar*

RESUMEN

La experiencia en materia de educación en entornos digitales ocurrida durante la pandemia, y el marco de los desafíos que impone la adecuación curricular que se está dando en las carreras de ingeniería, encuentra a las Facultades de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) con un déficit en la oferta de asignaturas en modalidades de cursadas alternativas a la opción presencial tradicional.

Teniendo en cuenta los resultados logrados desde la cátedra de Ingeniería y Sociedad de la Facultad Regional Avellaneda con el dictado en modalidad virtual durante 2020 y 2021 en el contexto de emergencia sanitaria, sumado a una experiencia piloto en el ciclo lectivo 2022, se conformó un equipo de investigación y elaboró un Proyecto PID-UTN donde se propone abordar el problema de la incorporación de actividades curriculares en entornos digitales para carreras de ingeniería en UTN. que fue aprobado e inició actividades en abril de 2024.

En este artículo se presentan algunos avances en lo que hace a la incorporación de la modalidad virtual como una alternativa para la enseñanza de las materias básicas en los primeros años de las carreras de ingeniería

Palabras clave: EaD, Bimodalidad, Prácticas virtualizadas, Formación de Ingenieros

ABSTRACT

Based on the results achieved by the Engineering and Society Department at the Avellaneda Regional Faculty with virtual teaching during 2020 and 2021 in the context of the health emergency, in addition to a pilot experience in the 2022 academic year, we formed a research team and developed a PID-UTN Project.

We propose to address the problem of incorporating curricular activities in digital environments for engineering programs at UTN. This project was approved and began operations in April 2024.

We present some progress regarding the incorporation of virtual learning as an alternative for teaching core subjects in the first years of engineering programs.

Key Words: Distance learning, bimodality, virtual classes, engineering training

INTRODUCCIÓN

En la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) la educación a distancia “tradicional” terminó con el inicio de la pandemia, los temas de interés de autoridades y docentes eran en ese momento: los materiales diseñados específicamente para la modalidad, mecanismos de evaluación, la soledad y la dificultad para comunicarnos y para conectarnos, la falta de grupalidad.

Luego, todas las miradas se depositaron en la educación a distancia, como la única posibilidad de enfrentar el confinamiento. El saber pedagógico acerca de la modalidad pasó a ser casi el “pulmón” del sistema universitario, clave para la supervivencia de nuestras instituciones.

Hoy cinco años, después y a través de la normativa vigente que lo avala y hasta lo estimula, como lo es la Resolución Ministerial 2599/2023, un nuevo desafío nos confronta: la multimodalidad.

Post pandemia cambia totalmente la escena. En principio porque hay una especificidad que se perdió, hoy los límites entre modalidades son porosos y poco claros. En las instituciones universitarias, donde en general la educación a distancia se alojaba en las áreas de sistemas, mutó y dejó de ser un problema de los informáticos a ser un problema académico. Antes, eran las diferencias de tiempo y lugar los ejes para pensar las prácticas docentes, y con un gran esfuerzo por sistematizar un campo que ya venía siendo problemático.

En términos provocativos, no es posible seguir pensando en nuestras universidades tal como la concebíamos; declarada o no sean cada vez más se despliegan las mixturas, con ofertas multimodales.

Desde entonces, hay asignaturas a distancia en carreras presenciales. Un estudio llevado adelante respecto de la experiencia de virtualización en pandemia en la UTN por Cuenca Pletsch y otros (2022) indica que se considera haber logrado un gran aprendizaje en muchos aspectos que permitirá incorporar nuevas herramientas y nuevos modos de trabajo en cada Facultad Regional, ya que el uso de TIC representa una alternativa a ser considerada en la formación de profesionales de ingeniería y que antes no había sido tenida mucho en cuenta.

Ingeniería y Sociedad

Ingeniería y Sociedad es una asignatura del campo de las Ciencias Sociales y Humanas de primer año de las carreras de Ingeniería en la UTN. Su objetivo es contribuir a la formación integral de potenciales ingenieros e ingenieras, enfocándose en la relación entre Ciencia, Tecnología y Sociedad. Desarrollar en el estudiantado competencias sociales, políticas, actitudinales y tecnológicas que les permitan abordar de manera crítica y responsable la relación entre ciencia, tecnología y sociedad. Esto implica cultivar una actitud ética y de responsabilidad social, así como a capacidad de encontrar soluciones sistémicas que integren aspectos políticos, económicos, sociales, ambientales y culturales, desde una perspectiva global y local para responder a los desafíos actuales. Es la única asignatura del área Ciencias Sociales en todo el diseño curricular de Ingeniería. Las ciencias sociales intentan dar cuenta de la relación existente entre el entorno social, en el nivel del desarrollo tecnológico y la actividad profesional del ingeniero, de manera que plantean como objetivo general contribuir a proveerlos de una perspectiva amplia que contemple las relaciones entre las variables sociales y el desarrollo tecnológico.

Modalidad a distancia en Facultad Regional Avellaneda

En 2022, tras dos años de dictado virtual de la asignatura Ingeniería y Sociedad, se llevó adelante una experiencia piloto en Educación a Distancia para elaborar un curso experimental de modalidad totalmente a distancia, en, Facultad Regional Avellaneda.

La propuesta de diseño del curso piloto presentó una modalidad de cursado a distancia, sin instancia presencial, usando el campus virtual de la UTN-FRA, (Moodle). La metodología de trabajo coincide y fue tomada como base para la organización de la propuesta bimodal que presentaremos a continuación en la Facultad Regional Bahía Blanca.

A partir de un mecanismo de selección llevado adelante a partir de un formulario de Google seleccionamos 53 estudiantes, teniendo en cuenta no disminuir la matrícula de los cursos presenciales (que ese año fue baja) y siguiendo la recomendación de trabajar con 20 a 25 estudiantes por tutor ya que somos un equipo de tres docentes. El inicio de clases, al igual que el cronograma de trabajo coincidió con el de los cursos presenciales. Como parte de la dinámica llevada a cabo en la asignatura en todos los cursos, independientemente de esta experiencia bimodal, al iniciar la cursada se realiza un primer relevamiento donde, entre otras cuestiones, nos resulta de interés conocer con qué equipamiento y conectividad cuenta cada estudiante.

El aprendizaje en línea implica más autonomía por parte del estudiantado. Por esto ofrecimos seguimiento, encuentros sincrónicos no obligatorios como apoyo, consignas claras, actividades innovadoras que promueven la participación y el trabajo en pequeños grupos, así como esquemas de entregas con plazos firmes a lo largo del curso. Se decidió agregar un apartado de videos con una duración entre 2 y 5 minutos denominados: “perlitas” donde cada docente presentaba al autor, su respectivo material, contexto en que se produce el trabajo y aporte teórico que ofrece su lectura a la problemática que presenta la Unidad (Varias de estas iniciativas fueron incorporadas en las propuestas de trabajos prácticos a desarrollar en la experiencia bimodal de Bahía Blanca).

Algunos datos de nuestros registros dan cuenta de:

De los 53 estudiantes seleccionados para participar de la cursada (hubo más de 150 postulantes), sólo 27 se presentaron y la entrega de tareas era de 20 estudiantes la semana 3. En la semana 3 de clases organizamos el primer encuentro sincrónico no obligatorio con una asistencia de 17 estudiantes. A partir de ahí, en función de pedidos reiterados, decidimos organizar un encuentro sincrónico no obligatorio semana por medio. La asistencia fue variando y disminuyendo con el correr de las semanas. Las tareas de la Unidad 1 las resolvieron entre 17 y 22 estudiantes. El trabajo práctico integrador de la unidad 1 fue resuelto por 24 estudiantes.

Cabe destacar que se realizó un seguimiento personalizado y continuo con mensajes a quienes han discontinuado el ingreso al aula. Hacia fin del primer cuatrimestre quedaron en condición de activos unos 25 estudiantes. No obstante, los datos de permanencia y seguimiento del curso superan a los de algunos cursos presenciales, que, durante el año que llevamos adelante la experiencia, comenzaron con baja inscripción y sufrieron un fuerte desgranamiento.

En síntesis, de 53 estudiantes admitidos, solo 27 iniciaron formalmente la cursada, 20 rindieron el 1er Globalizador y 17 terminaron y aprobaron de manera directa la asignatura. Una vez concluida la edición piloto de este curso en modalidad EaD, encontramos como principal dificultad que a pesar de haber aclarado desde que se realizó la convocatoria que el curso era totalmente asincrónico, el estudiantado se anotó con la certeza que tendríamos encuentros sincrónicos semanales pero online en vez de en la Facultad.

Con este antecedente, surge la propuesta de Ingeniería y Sociedad bimodalizada. Aquí vamos a presentar el modo en que se organiza la práctica docente ejemplificando actividades presenciales y no presenciales y el modo en que se combinan. En su actual implementación aparecen cuestionamientos y reflexiones respecto al modo en que esta modalidad transforma y condiciona las prácticas, el profesorado, el alumnado y la institución toda; y la medida en que es posible sostener el modelo pedagógico centrado en el estudiante para el desarrollo de competencias de los Diseños Curriculares de las carreras de ingeniería de la UTN. A la vez, dado que estas prácticas son objeto de la investigación Proyecto PID TEIFIAV0010085TC “Incorporación de actividades curriculares en entornos digitales para carreras de ingeniería en UTN. El caso de Ingeniería y Sociedad”, se presentan los resultados obtenidos en las primeras ediciones de comisiones con dictado bimodal en 2023.

Características del proyecto y su implementación

A partir de la convocatoria del Sistema Institucional de Educación a Distancia del Rectorado de UTN (SIED UTN) para el diseño e implementación de una experiencia prototípica de cursado bimodal de Ingeniería y Sociedad en UTN, se efectuó en la primera mitad del año 2023 el proyecto con la conformación de un equipo de trabajo y la elaboración de la organización curricular, el diseño de los materiales pedagógicos y su implementación durante el segundo semestre, para su posterior evaluación al finalizar.

El proyecto, elaborado por integrantes de la Asignatura Ingeniería y Sociedad de la UDB Cultura e Idioma de UTN FRBB, tuvo el apoyo de SIED y de la Prof. Dra. Karina Ferrando (UTN FRA). Fue presentado y aprobado por el Consejo Departamental del Dpto. de Ciencias Básicas y posteriormente por Consejo Directivo de la Facultad, por Resolución 307/2023. En la misma se aprobó “el dictado de 3 (tres) comisiones de la Asignatura Ingeniería y Sociedad durante el ciclo lectivo 2023 en el formato BIMODAL”.

Los resultados esperados propuestos fueron:

1. Diseñar la planificación de un curso bimodal de la asignatura Ingeniería y Sociedad durante el primer semestre para su implementación en el período siguiente.
2. Establecer la matriz de tributación de competencias, los resultados de aprendizaje y los criterios de evaluación de la Asignatura para orientar el proceso formativo.
3. Diseñar todas las actividades pedagógicas y los recursos de enseñanza y aprendizaje, con acciones de integración en otras asignaturas, para su desarrollo en el dictado en las aulas físicas y virtuales en este año 2023.
4. Organizar el sistema de evaluación con los criterios, el sistema de calificación y los instrumentos pertinentes para estudiar el nivel de aprendizajes logrado por los y las estudiantes.
5. Investigar el proceso y los resultados del curso bimodal de Ingeniería y Sociedad, teniendo en cuenta las metas propuestas, para proponer mejoras y su posible transferencia a colegas de la asignatura.

Se propuso implementarlo en el segundo semestre en las Comisiones 6 y 7 (turno noche) y en la 16 (turno mañana). Sobre un total de 16 semanas de clases la propuesta consistió con un 38% de actividades asincrónicas (6 clases) y 62% presencial (10 clases). Se utilizaron Aulas Virtuales del Campus Virtual Global de UTN para cada una de las Comisiones.

Metodología de trabajo en bimodalidad en Facultad Regional Bahía Blanca

La cursada se organiza a partir de un cronograma que se ofrece al estudiantado al inicio de clases, indicando qué días corresponden a clases presenciales y cuales a encuentros virtuales asincrónicos. En la Universidad se cuenta con normativa que clasifica y caracteriza las diferentes modalidades de interacción pedagógica en la normativa Ordenanza 2031.

Se utilizan diferentes recursos disponibles en la plataforma y en el espacio de trabajo de Google, que permiten acceder a materiales educativos en distintos formatos y realizar actividades mediante formularios, juegos, lecciones, cuestionarios y otros recursos presentes en la plataforma Moodle, y entrega virtual de tareas. Estas actividades dan cuenta de la vinculación e integración de los diferentes autores analizados en cada unidad temática del programa.

El objetivo no es sólo incorporar contenidos teóricos, sino también lograr que el estudiantado adquiera y mejore (entre otras) sus competencias en expresión oral y escrita.

Se plantean actividades de diverso tipo y nivel de complejidad, para facilitar la comprensión de textos y la transferencia de los saberes teórico-conceptuales a situaciones concretas. El diseño de la propuesta fue compartido entre docentes de Facultad Regional Avellaneda y Facultad Regional Bahía Blanca. Se elaboró material audiovisual para acompañar cada propuesta, incluyendo videos de docentes explicando el tema a trabajar y las consignas, también infografías y recursos didácticos en diversos soportes, algunos de carácter obligatorio y otros complementarios. Luego, las tareas fueron corregidas por quienes la diseñaron, ofreciendo un comentario de retroalimentación al estudiantado desde el aula virtual (ver Figura 4).

Se proponen, en líneas generales, al finalizar cada una de las unidades del curso trabajos prácticos integradores que reflejan la comprensión, análisis y reflexión articulando temas y conceptos vistos en la unidad con un caso concreto elegido por cada estudiante entre los propuestos por la cátedra (ver Figura 1).



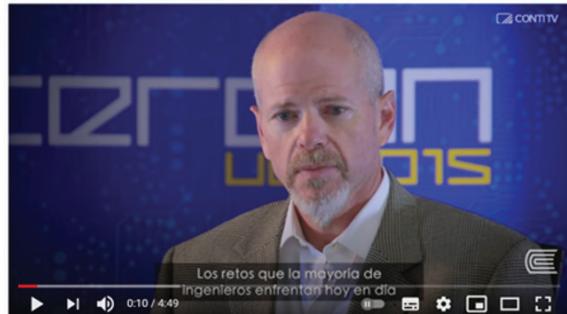
Figura 1: Ejemplo de Trabajo Práctico Integrador de final de Unidad

La organización del aula cuenta con un diseño amigable y con secciones que permiten a la clase identificar claramente la información disponible.

Se utilizan recursos audiovisuales cortos al inicio de cada unidad temática en general y cada tema en particular a modo de disparador (ver Figuras 2 y 3).



Figura 2: Recursos utilizados en el aula por ejemplo Nubes de Palabras



Retos y aportes del ingeniero a la sociedad

Figura 3: Recursos utilizados en el aula por ejemplo videos cortos para presentar temas

En términos de la UNESCO (2021) “las tecnologías digitales están abriendo nuevos espacios de aprendizaje”, una nueva dimensión de la experiencia educativa que libera el aprendizaje de cualquier atadura geográfica. El mayor desafío consiste en generar ecosistemas que permitan la creación de plataformas educativas de calidad con el fin de integrar la educación presencial y digital, respetar y tener en cuenta a los docentes, y garantizar el derecho a la educación. Los modelos

híbridos son una oportunidad para redefinir los significados y objetivos de la educación en una sociedad cambiante y desigual.

Como parte de la dinámica que plantea en la asignatura en todos los cursos, independientemente de esta experiencia bimodal, al iniciar la cursada se realiza un primer relevamiento donde, entre otras cuestiones, nos resulta de interés conocer con qué equipamiento y conectividad cuenta cada estudiante.

En ese sentido, Soletic (2021) afirma que integrar los modelos híbridos en el sistema educativo requiere asegurar el acceso a equipamiento y conectividad de calidad. Para ello es necesario realizar un diagnóstico preciso de las dificultades que atraviesan tanto los y las estudiantes y docentes como las instituciones, y formular políticas adecuadas para enfrentar cada situación.

La comunicación es otro factor estratégico para sostener las instancias asincrónicas en la bimodalidad. Se requiere de una comunicación efectiva y constante a través de la interacción recíproca y frecuente entre docentes y estudiantes, el intercambio, el diálogo, la reflexión y la consecuente consolidación del conocimiento conlleve a mejorar la concreción de los objetivos planteados.

La cátedra definió un tono comunicacional, para los comentarios de tipo constructivo, no punitivo, indicando qué pedimos en la consigna del trabajo, qué esperamos y qué encontramos. Las indicaciones respecto de aspectos a mejorar son siempre sugerencias en cuanto a volver a leer ciertos materiales o revisar las presentaciones (diapositivas) de clases que se dejan publicadas en el aula virtual. La intención es motivar, alentar a la mejora. Esta decisión se fundamenta en la concepción acerca de la enseñanza como una actividad eminentemente comunicativa, tal como señalan Fornieles Alcaraz y Pulido Moyano (2019): “Para desarrollar esta corresponsabilidad ante el aprendizaje se necesita crear un clima de diálogo, de negociación y búsqueda de entendimiento permanente entre el profesorado y el alumnado. Por ello es necesario intensificar las relaciones de comunicación de forma más personalizada, tutelando la progresión de los aprendices con un nivel de individualización superior (Mérida 2006: 13). Al igual que otros autores, (por ejemplo, García Ramírez, 2012) concebimos la actividad al interior del aula de clase como una actividad eminentemente comunicativa (Nussbaum y Tusón, 1996).” (p.96)

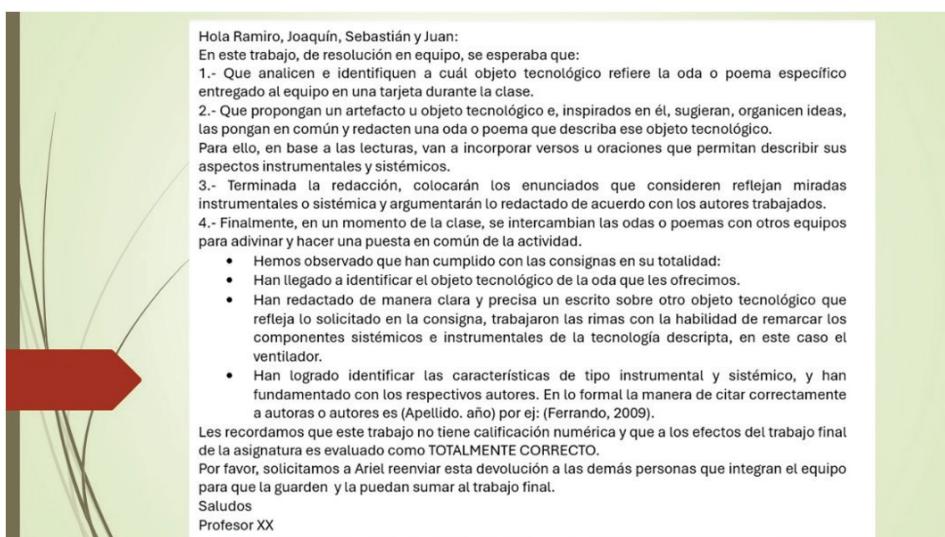


Figura 4: Ejemplo de retroalimentación para actividad realizada en equipo

En función de estas consideraciones es que también destacamos la importancia tanto de contemplar las preguntas incluidas en cada formulario de relevamiento, como realizar la designación de docentes a cargo de estos cursos en bimodalidad, procurando que cuenten con la capacitación necesaria y se muestren dispuestos a dedicar el tiempo extra que esta modalidad requiere en comparación con la presencial.

Evidencias empíricas

Para el caso de los cursos bimodales, en las encuestas implementadas al finalizar cada curso, se agregaron preguntas específicas que permitan recoger datos de los propios destinatarios que posibiliten evaluar la manera en que el estudiantado experimentó la nueva dinámica de trabajo.

Algunas de las preguntas incorporadas al cuestionario utilizado para relevamiento de datos de la experiencia:

- ¿Cómo consideras la experiencia de cursado bimodal de Ingeniería y Sociedad en relación con la presencialidad?
- ¿Por qué?, ¿en qué te ayudó o dificultó el cursado bimodal?
- ¿Cómo consideras que influyó el cursado bimodal en tus aprendizajes?
- ¿Cómo te resultó el aula virtual para aprender?

Respecto de la experiencia en cursado bimodal, aspectos positivos y dificultades compartimos algunos comentarios:

- Me ayudo en manejar mis tiempos y me dificulto un poco cuando no estaba del todo claro lo que había que hacer
- Yo creo que al ser bimodal me permitió ser flexible a la hora de resolver los prácticos, ya que sabía que estaban en el aula virtual y podía acceder en cualquier momento
- El cursado bimodal, que combina clases presenciales con sesiones en línea, me ofreció tanto ventajas como desafíos. La flexibilidad de horarios me permitió gestionar mejor mi tiempo, adaptando el estudio a mi propio ritmo y otras responsabilidades. Además, la disponibilidad de materiales de estudio, grabaciones de clases y foros de discusión en línea facilitó el repaso de conceptos y la clarificación de dudas fuera del horario de clases presenciales.
- Ayudó mucho para ponerme al día con todas las materias
- Considero que no es ni mejor ni peor. Está bueno tener un balance entre ambas.
- La modalidad asincrónica te ayuda a ser organizado y aprender de forma autónoma
- Me enseñó a organizarme de manera optima
- Me ayudo de forma que me hizo aprender a buscar y encontrar información y utilizar la información que nos brindaron de forma más independiente.
- Me ayudo un montón ya que viviendo lejos es un largo trayecto

Los datos analizados en las comisiones en que se desarrollaron las primeras experiencias dan cuenta que el cursado bimodal en Ingeniería y Sociedad de UTN en la Facultad Regional Bahía Blanca, tanto en el segundo semestre de 2023 como en el primer cuatrimestre de 2024 tuvo un desarrollo satisfactorio.

Se implementó en las Comisiones 6 y 7 (turno noche) y Comisión 16 (mañana). Contó con el 40% asincrónico -6 semanas-, 60% presencial -9 semanas- y 1 semana de feriado. En base a los Resultados de Aprendizaje se confeccionaron las guías y actividades con el soporte de Aulas Virtuales de SIED. El Consejo Directivo de FRBB (Res. 307/2023) avaló el proyecto con muchas actividades grupales para vincular las fuentes de estudio con hechos y casos, presentaciones audiovisuales, exposición, elaboración de proyecto tecnológico para resolver problemáticas y de emprendedorismo, entrevista a investigadores, jornada de integración en el Parque Industrial Bahía Blanca y ensayo final.

Se presentan algunos resultados de la implementación de las 3 Comisiones en que se desarrolló la primera edición en 2023 en la Facultad Regional Bahía Blanca. La experiencia comenzó en la semana del lunes 14 de agosto y culminó el viernes 1 de diciembre. En términos generales, en las ediciones llevadas adelante, se realizaron las tareas diseñadas y propuestas en el Proyecto original de Planificación de cátedra para la asignatura. Los mismos surgen de relevamientos realizados al inicio, mitad y fin del curso.

Al inicio del cursado se consultó sobre condiciones de acceso a conexión a Internet y dispositivos de uso personal para acompañar la cursada.

Se aprecia que la totalidad de cursantes accede a conexión wifi en su domicilio y, eventualmente, casi la mitad podría utilizar datos móviles de ser necesario y que la totalidad de estudiantes dispone de computadoras de escritorio y/o notebooks.

Consultados sobre si ese o esos dispositivos fueron de uso personal, el 90% señaló que sí y el resto que lo comparte con integrantes de la familia. Al finalizar el cursado se consultó en las instancias no presenciales desde qué dispositivo se conectaba y se obtuvieron los siguientes datos:

En lo que respecta a ofrecer una valoración de los tipos de materiales seleccionados y ofrecidos para favorecer sus aprendizajes, en el relevamiento de mitad cursado, señalaron lo siguiente (Figura 5):

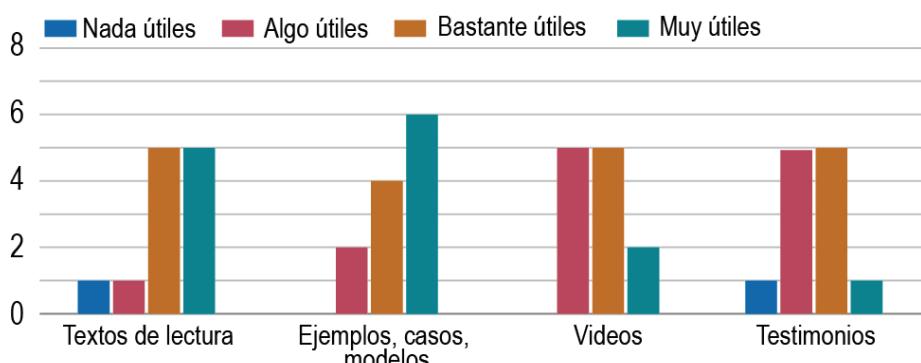


Figura 5: Valoración de materiales ofrecidos

El estudio de casos y la lectura de textos han sido los mejor ponderados, seguidos por los videos y testimonios.

Respecto de la valoración del modo en que las estrategias y recursos ofrecidos contribuyeron a lograr aprendizajes, se registra lo siguiente (Figura. 6):

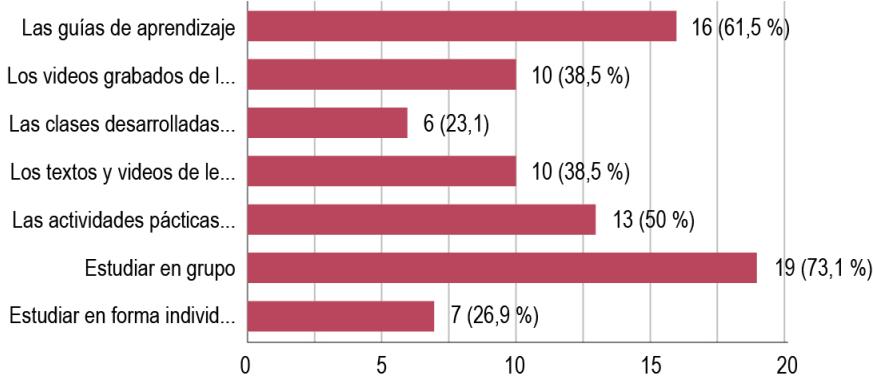


Figura 6: Aspectos que ayudaron a aprender en bimodalidad

También se les consultó para conocer cómo resultaron las retroalimentaciones y devoluciones de evaluaciones y actividades prácticas. Los datos obtenidos dan cuenta de lo siguiente (Figura 7):

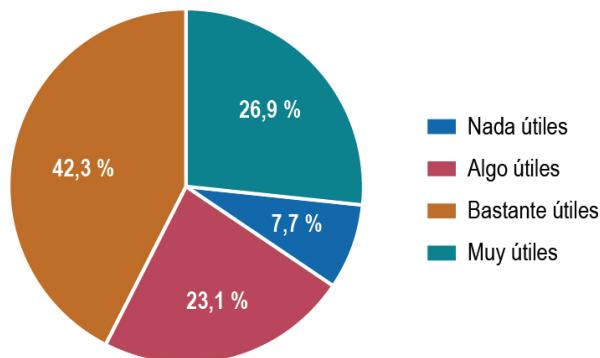


Figura 7: Valoración de retroalimentaciones ofrecidos

Al respecto resulta muy bajo el porcentaje de estudiantes que no lograron considerar de manera positiva este ítem.

Se emplearon rúbricas en muchas de las actividades prácticas que se presentaron junto con las consignas, por ello a mitad de cursado se les consultó si las utilizaban y el 92% señaló que sí, y a fin de cursado: el 8% señaló que les sirvieron mucho, el 42% bastante, el 35% poco y el 15% reconoció que no las utilizó.

Consultados a mitad y final del ciclo acerca de cómo les resultó la comunicación con sus docentes, se apreciaron los siguientes datos (Figura 8):

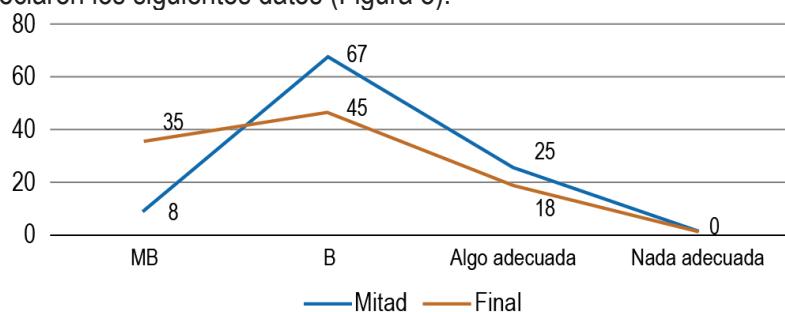


Figura 8: Comunicación con Docentes

Se aprecia un crecimiento notable en la valoración “Muy buena” para el relevamiento final de cursada respecto de mitad de cursada, sin registrarse casos para “Nada adecuada”.

En cuanto a la comunicación entre estudiantes, señalaron que resultó: Excelente: 9%, Muy buena: 36%, Buena: 46% y Mala: 9%.

Al finalizar la cursada, en el relevamiento final el 58% señaló que la experiencia bimodal fue mejor que la presencialidad, el 42% igual, nadie señaló que fue peor y al requerirles fundamentos, en su mayoría señalaron las siguientes expresiones:

- Me ayudó a acomodar mejor mis horarios, se gana en tiempo (muchos)
- Me ayuda a organizarme mejor (muchos casos)
- El día sin clase agilizaba la mañana, podía hacer el trabajo el día que no tenía clase (bastantes casos)
- No cambio mucho, considero igual, no varía (varios)
- Se pierde el trato presencial, está bueno hablar con docentes y compañeros (varios casos)
- A veces no se comprenden los textos o los temas y se resuelve en la clase (varios casos)
- No me gusta la virtualidad (algunos pocos casos)

Por otra parte, al preguntarles al finalizar cómo influyó el cursado bimodal en sus aprendizajes, el 19% señaló “logré muy buenos aprendizajes”, el 50% “logré aprendizajes adecuados”, el 31% “tuve algunas dificultades para aprender” y nadie señaló “tuve muchas dificultades para aprender”.

Y al consultar por qué efectuaron dichas valoraciones, las respuestas se agruparon por afinidad:

- “Por la fluidez y autonomía que me brindaban. Seguía mi ritmo y no la presión de que constantemente estén ahí. Porque considero que es un buen método, ya que se nos brindó nuestro espacio de estudio y trabajo autónomo, así como también momentos presenciales de consulta.”
- Al no tener todas las semanas clases me podía poner a entender bien lo explicado en la semana que se hace virtual. Gracias a la libertad de trabajar en casa en cualquier momento del día. Dado que el sistema de cursada me quedó cómodo, siento que el aprendizaje fue mejor.
- Tuvimos muy buena dinámica de grupo con mis compañeros.
- Se hizo difícil aprender ciertos conocimientos ya que de muchos archivos que están cargados. En el aula virtual y al no saber muy bien cómo se manejaba perdía un poco el hilo de la materia.”

Al consultarles al final sobre otros aportes relacionados con la experiencia de cursada bimodal, las principales más reiteradas y significativas fueron:

- “Repite, creo que la decisión que tomaron de que Ingeniería y Sociedad sea bimodal fue bastante acertada porque logró que nos hicieran un poco más independientes y no tener que depender todo el tiempo de tener enfrente a una persona explicándonos un tema”.
- “La modalidad está buena para materias no técnicas, pero no la recomendaría para materias como física o análisis”.

Se obtuvo información por registros propios, diálogo con cursantes en clase y encuestas a mitad y fin de cursado. Los buenos resultados motivaron su implementación en el primer cuatrimestre

de 2024 en las Comisiones 13 y 14 (mañana) y 12 y 15 (noche), por Res. 5/2024 CD FRBB, con características similares.¹

La mayoría de los estudiantes valoran la experiencia con sorpresa destacando que adquieran nuevas capacidades de organización y regulación de sus tiempos y cursado, con posibilidades de estudiar y aprender en diversos horarios. Se destaca que el promedio de estudiantes regulares es superior al cursado sólo presencial, con el 77% en 2023 y 82% en 2024, superando el 65% como valor de los últimos 10 años en Ingeniería y Sociedad FRBB. Son pocos los y las estudiantes que plantearon cursar totalmente presencial, sugieren que los demás ingresantes realicen la experiencia, pero también creen que les costaría el cursado bimodal en algunas áreas.

El porcentaje de regularidad que alcanzaron los y las estudiantes, teniendo en cuenta los cursantes reales del ciclo lectivo (50/64) es un dato relevante porque evidencia que la propuesta de combinar clases presenciales y asincrónicas tiene una interesante potencialidad,

Los equipos docentes participantes han realizado reuniones antes, durante y al concluir la cursada. El grupo concluye que la experiencia fue positiva. En el balance final, esta valoración, sumada a la información que han brindado quienes cursaron, permitirá fortalecer y mejorar diversos aspectos de la experiencia formativa bimodal. Estos resultados, llevaron a definir que en 2024 se haya extendido la bimodalidad a la totalidad de las comisiones de Ingeniería y Sociedad en la Facultad Regional Bahía Blanca.

Luego de la experiencia de Bahía Blanca, y a partir de las dificultades que ofreció la propuesta 100% asincrónica desarrollada en Avellaneda, es posible que la bimodalidad sea una oportunidad para explorar a futuro - esto también estaría contemplado de la normativa institucional vigente.

Conclusiones

La propuesta aquí presentada busca encontrar la mejor combinación de prácticas, el equilibrio de la óptima intervención pedagógica para cada lugar, para cada sujeto de aprendizaje, para cada disciplina y para cada modelo pedagógico referencial de la institución. Lejos de responder solamente a una lógica instrumental, la incorporación de las TIC tiene sentido si es para enriquecer la formación universitaria y con una vocación de ampliación de las competencias del alumnado en tanto interactúen con otras todas las herramientas digitales disponibles.

Los resultados que se desprenden de estas primeras ediciones dan cuenta del potencial que tiene continuar e incrementar los casos de asignaturas que puedan dictarse en modalidad combinada en nuestras carreras tecnológicas. Si bien en la UTN; se trata de propuestas aisladas en el seno de unas pocas Facultades que aún carecen de la sistematización que permitan su transferencia o replicabilidad. Más allá de las características propias del diseño instruccional y el poco tiempo que ha transcurrido desde el inicio de tareas de nuestro equipo de investigación, tenemos por delante incorporar en nuestros instrumentos de relevamiento de datos aspectos que nos permitan ahondar en torno a nuestra investigación. Conocer el modo en que se han desarrollado algunas experiencias en formato bimodal y proporcionar una guía procedural para el diseño de propuestas de formación para profesionales de la ingeniería desde el enfoque basado en competencias, con

1 A la fecha no se cuenta con la información respectiva sistematizada y por consiguiente no fue posible incluirla en este trabajo.

aprendizaje centrado en el estudiante e incorporando entornos educativos digitales para la asignatura Ingeniería y Sociedad, se convierte en un insumo valioso y transferible a otras asignaturas y equipos docentes interesados.

Detectamos que aún hace falta seguir elaborando normativas que regulen nuestras prácticas, sobre todo en lo referente al teletrabajo del equipo docente. Destacamos aquí el apoyo del Consejo Superior de UTN y desde el Consejo Directivo de la Facultad Regional Bahía Blanca en cuanto a reforzar con normativa específica el desarrollo de actividades pedagógicas en formatos no tradicionales.

Sin embargo, el Ministerio exige para materias presenciales y virtuales, la misma carga horaria, los mismos créditos, parecería que es lo mismo dictar un análisis matemático asincrónicamente que dictarlo presencialmente, y no es lo mismo. Claramente no pasan las mismas cosas en cada una de las modalidades, las intervenciones docentes no son las mismas, las actividades no son las mismas, los materiales no son los mismos, estamos intentando homogenizar lo que no es homogéneo y esto no quiere decir que no se puedan desarrollar las mismas competencias. Se pueden desarrollar las mismas competencias, pero los modos para llegar a ese desarrollo son muy diferentes.

Bibliografía

Consejo Interuniversitario Nacional (CIN) (2021), “Declaración Ministerio de Educación - CIN 14 de diciembre de 2021,” Dec. 14, 2021. Recuperado de: <https://www.cin.edu.ar/declaracion-ministerio-de-educacion-cin-14-de-diciembre-de-2021/>

Cuenca Pletsch, L. y otros (2022) La UTN en el bienio 2020-2021: sus procesos pedagógicos. EduTecne. Recuperado de; <https://ria.utn.edu.ar/handle/20.500.12272/6659>

Fornieles Alcaraz, J., & Pulido Moyano, R. (2019). De la excelencia universitaria a la habilidad comunicativa del docente. Universidad de Almería. Recuperado de <https://www.aidu-asociacion.org/wp-content/uploads/2019/12/De-la-excelencia-universitaria-a-la-habilidad-comunicativa-del-docente.pdf>

Ministerio de Educación (2023), Resolución Ministerial 2599/23, Recuperado de: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-2599-2023-393379/texto>

Soletic, A. (2021). “Modelos híbridos en la enseñanza: claves para ensamblar la presencialidad y la virtualidad,” Informe, Buenos Aires: CIPPEC. Recuperado de: <https://www.cippec.org/wp-content/uploads/2021/08/INF-EDU-Modelos-hi%CC%81bridos.pdf>

UNESCO (2021). AI and education Guidance for policymakers. UNESCO: París. Recuperado de: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000376709>

Universidad Tecnológica Nacional (2018). Ordenanza 1637 Aprueba reglamento del sistema institucional de educación a distancia de la Universidad Tecnológica Nacional. Recuperado de: <http://csu.rec.utn.edu.ar/docs/php/salida.php3?tipo=ORD&numero=1637&anio=0&facultad=CSU>

Universidad Tecnológica Nacional (2024). Ordenanza 2031/24 Modificación del sistema institucional de educación a distancia de la UTN. Recuperado de: <https://www.utn.edu.ar/images/Secretarías/SACAD/SIED/2031.pdf>

Universidad Tecnológica Nacional (2023) Proyecto PID TEIFIAV0010085TC “Incorporación de actividades curriculares en entornos digitales para carreras de ingeniería en UTN. El caso de Ingeniería y Sociedad”,

Dossier Jornadas de Ingeniería Química Sustentable 2024

SÍLICES AMINOFUNCIONALIZADAS PARA LA ADSORCIÓN DE CO₂: IMPORTANCIA DEL TRATAMIENTO POST-SÍNTESIS

Guillermo D. Aquino^{1,2}, Cristian M. Piqueras³, M. Sergio Moreno⁴, Lucas L. Panizza², Germán P. Benedictto^{1,2} y Andrea M. Pereyra^{1,5,*}

¹Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas “Dr. Jorge J. Ronco”,

²Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Avellaneda.

³Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI), UNS-CONICET.

⁴INN, CNEA-CONICET-Centro Atómico Bariloche.

⁵Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnologías de Materiales.

*Autora a quien la correspondencia debe ser dirigida: andreampereyra@yahoo.com

RESUMEN

En este trabajo se investigó la influencia de diversos tratamientos térmicos, aplicados a la sílice MCM-41, sobre la capacidad de captura de CO₂. La retención del gas se evaluó mediante FTIR *in situ* en condiciones de baja presión y diferentes temperaturas. Los resultados mostraron que la preservación de los grupos silanol durante la calcinación es crucial para maximizar la incorporación de grupos amino, lo que mejora la capacidad de adsorción de CO₂ del material. Los materiales funcionalizados con APTS mostraron una notable sensibilidad a la adsorción de CO₂ incluso a muy baja presión. Además, se corroboró que el CO₂ adsorbido permanece retenido después de someter el material a condiciones de alto vacío y temperaturas de hasta 100 °C, lo que indica su potencial para aplicaciones de almacenamiento de CO₂.

Palabras Clave: MCM-41, tratamiento térmico, grupo silanol, 3aminopropil, adsorción de CO₂.

INTRODUCCIÓN

Las sílices mesoporosas ordenadas requieren la remoción del agente estructurante utilizado durante su síntesis, un proceso comúnmente realizado mediante calcinación. Sin embargo, los tratamientos térmicos asociados a la calcinación pueden alterar significativamente la química superficial del material, promoviendo la condensación de los grupos silanol en grupos siloxano a medida que aumentan las temperaturas y tiempos de tratamiento (Araujo et al., 2000).

La preservación de los grupos silanol es crucial para la modificación superficial del material, ya que estos pueden reaccionar con alcoxisilanos, permitiendo el anclaje de grupos orgánicos. En Aquino et al. (2023) se demostró que la cantidad de grupos silanol remanentes después de la calcinación influye directamente en la cantidad de grupos funcionales que pueden incorporarse, afectando así el desempeño del material en aplicaciones específicas, como la adsorción de CO₂.

En este trabajo, se compara el desempeño de dos muestras de MCM-41, sometidas a diferentes tratamientos térmicos y modificadas con grupos 3aminopropil para la captura de CO₂. Se realizaron mediciones in-situ de FTIR para evaluar la retención de CO₂ bajo condiciones de baja presión, analizando el impacto de los tratamientos térmicos en la capacidad de adsorción del material.

EXPERIMENTAL

Materiales

Los reactivos empleados fueron: silicato de sodio industrial (27,35 %p/p SiO₂, 8,30 %p/p Na₂O, Mejorsil), cloruro de hexadeciltrimetilamonio (48-50 %p/p CTAC, 30-35 %p/p EtOH, Meranol), ácido sulfúrico (98 %p/p, Anedra), etanol absoluto (99,5 %p/p, Anedra) y 3aminopropiltrimetoxilsilano (APTS) (98 %p/p, Merck).

Síntesis de la MCM-41

El material se sintetizó conforme a la metodología reportada previamente (Aquino et al., 2024) empleando soluciones de origen industrial de silicato de sodio y cloruro de hexadeciltrimetilamonio como fuente de sílice y agente estructurante, respectivamente.

Remoción del agente director de la estructura

El agente estructurante fue removido empleando dos tratamientos térmicos diferentes; calcinando el material a 510 °C por 2 h, calentando 5 °C/min (TC), y a 540 °C por 10h, calentando 1 °C/min (TP).

Funcionalización de los materiales

La funcionalización de los materiales con APTS se realizó de acuerdo con la metodología de “wet-grafting” detallada previamente (Aquino et al., 2023).

Caracterización del material

La caracterización de los materiales utilizados no es presentada en este trabajo. Los resultados de los estudios de dispersión de rayos X (SAXS), adsorción/desorción de N₂, microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM) pueden encontrarse en trabajos anteriores (Aquino et al., 2024).

Ensayos de adsorción de CO₂

La capacidad de adsorción de CO₂ de los materiales estudiados se realizó mediante espectroscopía infrarroja por reflectancia difusa (DRIFTS) en un equipo Thermo Fisher Scientific Nicolet 6700 equipado con un detector MCTA de baja temperatura. El equipo se encontraba acoplado a una celda sellada que permitía el tratamiento de las muestras con gases a temperatura controlada. Los espectros se tomaron después de dosificar 2 mmHg de CO₂ y luego en condiciones de alto vacío a diferentes temperaturas hasta 100 °C.

RESULTADOS

Interpretación de los espectros

La adsorción de CO₂ en sílices modificadas con grupos amino ha sido estudiada previamente por medio de FTIR in-situ en otro trabajo (Aquino et al., 2024). Las bandas observadas en la Figura 1 entre 1700 cm⁻¹ y 1300 cm⁻¹ se atribuyen comúnmente a los grupos C=O, -COO⁻ y -NH₃⁺, resultantes de la interacción entre el grupo 3-aminopropil y el CO₂ en fase gaseosa, como se esquematiza en la Figura 2.

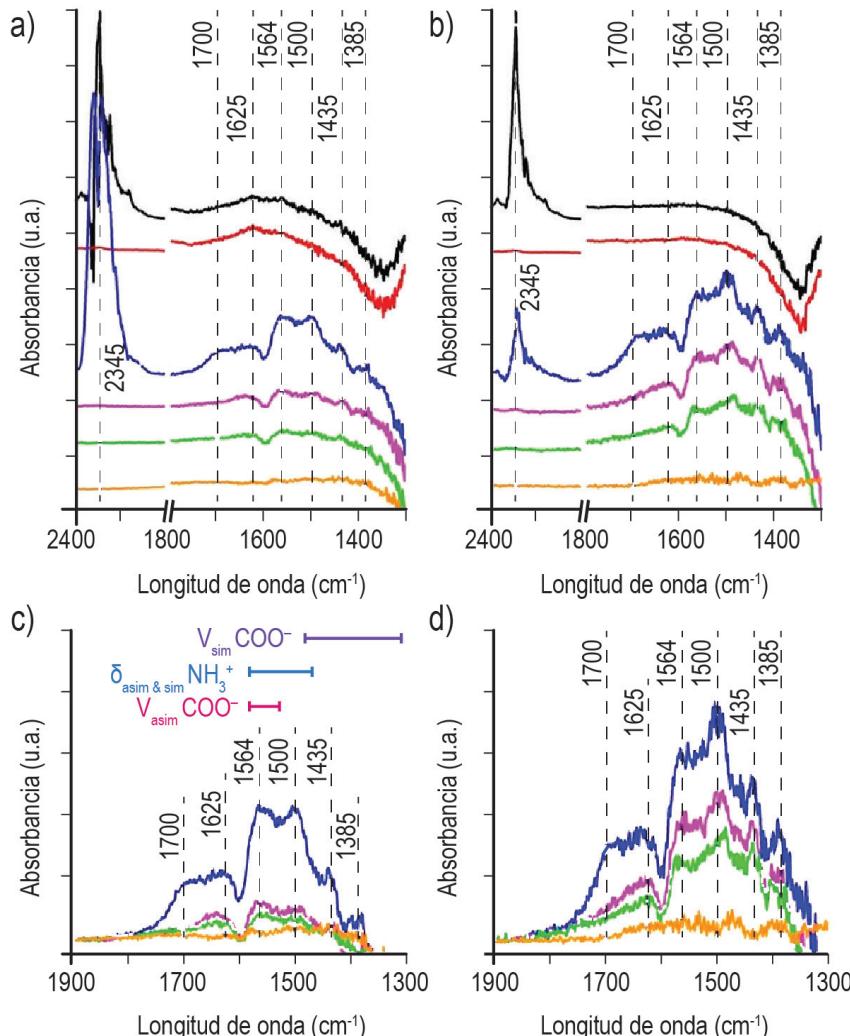


Figura 1: Espectros FTIR de muestras TP (a) y TC (b), y muestras TP funcionalizadas (c) y TC funcionalizadas (d) con la línea de base substraída. MCM-41 de base en 2 mmHg de CO₂ (negro) y en vacío (rojo). MCM-41 funcionalizada en 2 mmHg de CO₂ (azul) y en vacío a 25 °C (verde) y 100 °C (naranja).

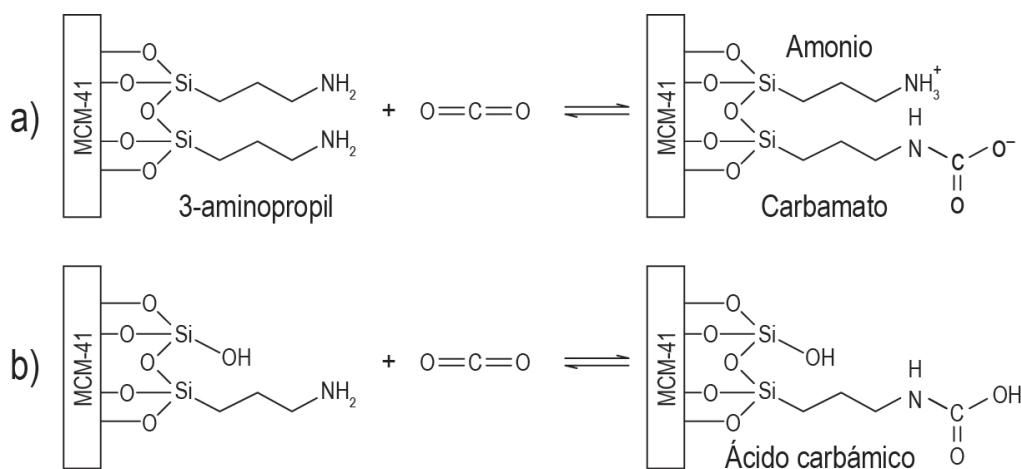


Figura 2: Quimisorción de CO_2 en grupos 3-aminopropil vecinales (a) y aislados (b).

Como parte de la interpretación, se asoció la primera banda observada entre aproximadamente 1750 cm^{-1} y 1600 cm^{-1} a una combinación del estiramiento del doble enlace $\text{C}=\text{O}$ alrededor de 1700 cm^{-1} , el cual se atribuye frecuentemente al ácido carbámico (no a la forma iónica COO^-), y la flexión asimétrica de NH_3^+ en iones amonio alrededor de 1625 cm^{-1} . Por otro lado, las bandas entre 1600 cm^{-1} y 1300 cm^{-1} presentan generalmente mayor dificultad para ser asignadas. En esta región pueden atribuirse tanto al estiramiento asimétrico y simétrico de los grupos COO^- , de los iones carbamato, como a la flexión asimétrica y simétrica de los grupos NH_3^+ , de los iones amonio. Las primeras se pueden observar en diferentes rangos: $v_{\text{asim}} \text{ COO}^-$ en $1580\text{--}1528 \text{ cm}^{-1}$ y $v_{\text{sim}} \text{ COO}^-$ en $1482\text{--}1310 \text{ cm}^{-1}$, mientras que las atribuidas a NH_3^+ se pueden ver en $1580\text{--}1469 \text{ cm}^{-1}$, superponiéndose con ambos rangos. Sin embargo, las bandas entre 1528 y 1482 cm^{-1} podrían asignarse únicamente a la presencia de iones amonio (Aquino et al., 2024). Finalmente, la banda alrededor de 2345 cm^{-1} se asigna al estiramiento asimétrico del CO_2 físicamente adsorbido (Bacsik et al., 2010, Gatti et al., 2017, Vilarrasa-García et al., 2015).

Adsorción de CO_2

Se observa en todas las muestras la presencia de una banda a 2345 cm^{-1} bajo una atmósfera de 2 mmHg de CO_2 y su desaparición en condiciones de vacío. Ambas MCM-41 de base (TC y TP) presentaron bandas similares en intensidad, mientras que el material TP modificado con grupos amino exhibió una banda más prominente en comparación con la muestra TC. Esta diferencia podría atribuirse a una mayor fisisorción de CO_2 en la muestra TP, lo cual puede estar asociado a una mayor hidrofobicidad de la superficie debido a la mayor pérdida de grupos silanol durante la eliminación del agente estructurante (Aquino et al., 2023). Por otro lado, solo en las muestras funcionalizadas se puede observar la aparición de bandas en el rango de $1700\text{--}1300 \text{ cm}^{-1}$ debido a especies quimisorbidas en los grupos NH_2 . El material TC modificado con grupos amino presentó

bandas de mayor intensidad en comparación a la muestra TP. Esto concuerda con las isotermas de adsorción de CO₂ estudiadas en un trabajo previamente publicado (Aquino et al., 2023), donde el material TC modificado exhibió una mayor capacidad de adsorción. La muestra TC modificada con grupos amino también mostró una mayor conservación de estas bandas en condiciones de vacío, lo cual podría indicar una mayor estabilización de las especies de CO₂ quimisorbidas. Esto es consistente con la mayor preservación de la banda a 1700 cm⁻¹, atribuida al ácido carbámico. Según Cho (Cho et al., 2018), los grupos silanol en superficie pueden contribuir a la estabilización del CO₂ quimisorbido en los grupos -NH₂ por medio de enlaces de hidrógeno. Esta preservación podría atribuirse a una mayor concentración de grupos silanol en la superficie de la muestra TC, como se mostró en el trabajo mencionado (Aquino et al., 2023). La banda desarrollada presentó una intensidad relativa superior en comparación con otras MCM-41 modificadas con amina (Tumuri et al., 2014, Gatti et al., 2017). Esto implica una mayor proporción de grupos aminopropil aislados y podría asociarse a una mejor dispersión ocasionada por la mayor difusión de las moléculas de APTS durante la etapa de grafting.

La presencia de una banda más prominente a 1500 cm⁻¹, asignada a NH₃⁺, podría atribuirse tanto a una mayor incorporación de grupos aminopropil como a una distribución más homogénea de estos en la superficie del material, lo cual permitiría que una mayor cantidad de moléculas de CO₂ quimisorbidas se estabilicen a través de la formación de pares iónicos carbamato-amonio, ya que ambas situaciones favorecen la presencia de grupos amino vecinos. La cantidad de grupos aminopropil de la muestra TC modificada fue de 1,54 mmol por gramo de material. Este valor resultó ser menor en comparación a los encontrados en bibliografía (Aquino et al., 2024). La capacidad de adsorción desarrollada resultó ligeramente superior considerando solo aquellos materiales evaluados en condiciones estáticas (Aquino et al., 2023).

Las bandas asignadas a las especies quimisorbidas desaparecen en condiciones de alto vacío a 100 °C, lo que podría indicar una desorción de la mayor parte de las especies quimisorbidas, confirmando la reversibilidad del material como adsorbente de CO₂ incluso en condiciones moderadas de temperatura.

CONCLUSIONES

El material funcionalizado mostró una notable sensibilidad a la adsorción de CO₂ a muy baja presión. La muestra tratada por menos tiempo a menor temperatura reveló una estabilización más efectiva de las especies de CO₂, posiblemente debido a una mayor concentración de grupos silanol en su superficie y una mejor dispersión de los grupos aminopropil durante la etapa de grafting.

Los resultados sugieren una mayor incorporación y distribución homogénea de los grupos funcionales empleando tratamientos más cortos y temperaturas menores, lo que facilita la formación de pares iónicos carbamato-amonio. La desorción de las especies quimisorbidas en vacío a 100 °C confirma la reversibilidad del proceso, destacando el potencial de estos materiales como adsorbentes eficientes y regenerables para la captura de CO₂ en condiciones moderadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aquino, G. D., Moreno, M. S., Piqueras, C. M., Benedictto, G. P., & Pereyra, A. M. (2023). Alternative Synthesis of MCM-41 Using Inexpensive Precursors for CO₂ Capture. *Inorganics*, 11(12), 480.
- Aquino, G. D., Moreno, M. S., Benedictto, G. P., & Pereyra, A. M. (2024). Industrially compatible synthesis of MCM-41 with spatial organization at the macro-mesoscale. *Microporous and Mesoporous Materials*, 377, 113225.
- Araujo, A. S., & Jaroniec, M. (2000). Thermogravimetric monitoring of the MCM-41 synthesis. *Thermochimica Acta*, 363(1–2), 175–180.
- Bacsik, Z., Atluri, R., Garcia-Bennett, A. E., & Hedin, N. (2010). Temperature-induced uptake of CO₂ and formation of carbamates in mesocaged silica modified with n-propylamines. *Langmuir*, 26(12), 10013–10024.
- Cho, M., Park, J., Yavuz, C. T., & Jung, Y. (2018). A catalytic role of surface silanol groups in CO₂ capture on the amine-anchored silica support. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20(17), 12149–12156.
- Gatti, G., Vittoni, C., Costenaro, D., Paul, G., Mangano, E., Brandani, S., Marchese, L., & Bisio, C. (2017). The influence of particle size of aminofunctionalized MCM-41 silicas on CO₂ adsorption. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 19(43), 29449–29460.
- Tumuluri, U., Isenberg, M., Tan, C. S., & Chuang, S. S. C. (2014). In situ infrared study of the effect of amine density on the nature of adsorbed CO₂ on amine-functionalized solid sorbents. *Langmuir*, 30(25), 7405–7413.
- Villarrasa-García, E., Moya, E. M. O., Cecilia, J. A., Cavalcante, C. L., Jiménez-Jiménez, J., Azevedo, D. C. S., & Rodríguez-Castellón, E. (2015). CO₂ adsorption on amine modified mesoporous silicas: Effect of the progressive disorder of the honeycomb arrangement. *Microporous and Mesoporous Materials*, 209, 172–183.

VALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE RAÍZ DE BATATA PARA LA BIOSÍNTESIS SUSTENTABLE DE ALFA-AMILASAS BACTERIANAS

Debora Conde Molina¹, Guillermina Bogao¹ y Graciela Corbino²

¹ Grupo de Biotecnología y Nanotecnología Aplicada, Facultad Regional Delta, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

² Estación Experimental Agropecuaria San Pedro, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina.

*Autora a quien la correspondencia debe ser dirigida: dconde@frd.utn.edu.ar

RESUMEN

La producción de batatas en la región noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina, genera una considerable cantidad de residuos. Este estudio se centró en el desarrollo de un bioproceso sostenible que aprovecha los residuos de raíz de batata (RRB) para la producción de alfaamilasas, enzimas con amplia aplicación industrial. Con tal fin se aisló y caracterizó la cepa bacteriana BMA1, evaluando su capacidad de crecimiento y producción de alfa-amilasas en medios líquidos compuestos por MSM (medio salino mínimo) con RRB y MSM con almidón. El bioproceso desarrollado en dos etapas, que consistió inicialmente en cultivar BMA1 en MSM + RRB (5 % p/v) para generar biomasa y luego transferirla a un medio MSM + almidón (1 % p/v) para inducir la producción de alfa-amilasas, permitió detectar la presencia de estas enzimas. Este trabajo resalta el potencial de transformar residuos agrícolas en valiosos recursos biotecnológicos, ofreciendo una solución sostenible para la producción de alfa-amilasas a escala industrial.

Palabras Clave: Agroresiduos, fermentación en medio líquido, producción de enzimas

INTRODUCCIÓN

El almidón es un polisacárido complejo que se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza. Las alfa-amilasas son enzimas clave en la degradación del almidón, catalizando la hidrólisis de los enlaces α -1,4glicosídicos en la cadena principal del polisacárido. Estas enzimas tienen una amplia aplicación en industrias como la alimentaria, textil, papelera y bioenergética, donde se emplean para la producción de jarabes de glucosa, mejora de productos horneados, tratamiento de tejidos y en la obtención de biocombustibles.

Las alfa-amilasas de origen bacteriano exhiben actividades óptimas en un rango de pH y temperatura adecuado para múltiples aplicaciones industriales. Estas enzimas son producidas principalmente por géneros como *Bacillus*, *Geobacillus* y *Thermomyces*, los cuales han demostrado ser altamente eficientes en la producción de alfa-amilasas a partir de diversas fuentes de carbono (Far-

et al. 2020). La producción de alfa-amilasas bacterianas se destacan no solo por su versatilidad y estabilidad bajo condiciones extremas, lo que las hace especialmente valiosas para aplicaciones en procesos industriales (Farooq et al. 2021).

Con el fin de reducir el costo de producción de las enzimas, resulta significativa la búsqueda de sustratos alternativos para dicha producción. En la región de San Pedro, Buenos Aires, Argentina, la producción de batata genera una considerable cantidad de residuos debido a que una parte significativa de la cosecha no cumple con los estándares comerciales y es desechara. Estos residuos representan una fuente potencialmente valiosa como materia prima en bioprocessos microbianos. La utilización de estos residuos no solo podría reducir los costos asociados con la producción de enzimas, sino también contribuir a la sostenibilidad ambiental al transformar subproductos agrícolas en insumos para procesos industriales.

En este contexto, el presente estudio explora el uso de residuos de raíz de batata como sustrato para la producción de alfa-amilasas bacterianas. El objetivo es desarrollar un bioprocreso eficiente y sustentable que permita la valorización de estos residuos, impulsando el desarrollo de una bioeconomía local en Argentina y contribuyendo a la reducción de la dependencia de importaciones en el sector enzimático.

METODOLOGÍA

Inicialmente se aisló una cepa bacteriana con doble capacidad, de crecer en un medio de cultivo formulado con residuo de raíz de batata (RRB) y de producir alfa-amilasas. Para ello se tomó una alícuota de un cultivo bacteriano mixto resultante de un cultivo de enriquecimiento conteniendo RRB (Conde Molina et al. 2023), y se sembró en placas de Petri contenido medio sólido de medio salino mínimo (MSM) + almidón (A) (Biopack). Las placas se incubaron a 25 °C durante 5 días. De esta manera se obtuvieron colonias aisladas de una cepa bacteriana que denominamos BMA1. La cepa BA1 se criopreservó con glicerol (15 % v/v) para su estudio.

La cepa BMA1 se caracterizó según la morfología de las colonias en placas con medio sólido Luria-Bertani luego de 48 hs de incubación a 25 °C. La morfología celular y tinción de Gram se determinaron por microscopía óptica.

El crecimiento de la cepa BMA1 y su capacidad para producir alfa-amilasas se estudió en cultivos líquidos formulados con MSM + RRB (5 % p/v) y con MSM + almidón (1 % p/v) según se indica en la tabla 1. El experimento 3 realizado en 2 etapas, es decir considerando el batch 1 y el batch 2, implican que el total de la biomasa del batch 1 fue cosechada mediante centrifugación en esterilidad para inocular el batch 2. Los cultivos se incubaron a 25 °C y 135 rpm, acorde a las condiciones de aislamiento.

Tabla 1. Condiciones de formulación de los medios de cultivos.

	Batch 1	Batch 2
Experimento 1	MSM + RRB	-
Experimento 2	MSM + almidón	-
Experimento 3	MSM + RRB	MSM + almidón

A partir de los cultivos se realizaron determinaciones de biomasa, actividad de alfa-amilasas y pH. La biomasa bacteriana se estimó mediante densidad óptica (DO) a 600 nm. La actividad de

alfa-amilasas se determinó empleando como sustrato almidón soluble (1 %) a 50 °C (buffer citrato de sodio 50 mM, pH 6), los azúcares reductores liberados se determinaron por el método de Nelson-Somogyi (McCleary & McGeough 2015). El pH se midió empleando un pHmetro.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

La cepa BMA1 caracterizada morfológicamente, mostró que las colonias crecidas en placas con medio sólido fueron medianas, de forma circular, de elevación convexa, de borde redondeado, de textura suave brillante y de color blanquecina. La morfología celular observada por microscopía fue bacilos y el tipo de pared celular Gram negativa (Figura 1).



Figura 1. Caracterización morfológica de la cepa BMA1.

Se evaluó la capacidad de la cepa BMA1 para producir alfa-amilasas en paralelo con su crecimiento bacteriano (Figura 2). Los ensayos revelaron que BMA1 alcanzó una biomasa significativa ($DO=13,75$) cuando se cultivó en un medio formulado con MSM + RRB durante 5 días, pero no se detectó actividad de alfa-amilasas en todo el período de incubación (Experimento 1). Por el contrario, en un medio formulado con MSM + almidón, el crecimiento bacteriano fue considerablemente menor ($DO=1,21$) y tampoco se observó actividad de alfa-amilasas (Experimento 2). Estos resultados indican que, si bien el medio con MSM + RRB resulta muy apropiado para el crecimiento de la cepa BMA1, este no estimula la producción de alfaamilasas bajo las condiciones evaluadas. El RRB proporciona una rica fuente de macronutrientes como carbohidratos, entre ellos azúcares y almidón, además de micronutrientes esenciales, incluyendo minerales como potasio, calcio, magnesio y fósforo (Laurie et al. 2022), que favorecen el crecimiento bacteriano. Por otro lado, en el medio MSM + almidón, el almidón actúa como la única fuente de carbono y energía, lo que induciría la biosíntesis de alfa-amilasas en respuesta a su presencia. Sin embargo, en el Experimento 2 la ausencia de actividad de alfa-amilasa podría deberse a la baja concentración de células.

En base estos resultados preliminares, se diseñó el Experimento 3, el cual se desarrolló en dos etapas. En la primera etapa, se cultivó BMA1 en MSM + RRB con el objetivo de generar una cantidad significativa de biomasa. Una vez cosechada la biomasa, se utilizó para inocular un segundo cultivo en MSM + almidón, buscando inducir la producción de alfa-amilasas. Este enfoque resultó en la detección de actividad enzimática, con valores que comenzaron en 88 mU/mL a los 7 días y alcanzaron los 445 mU/mL al cabo de 12 días. Este incremento en la actividad enzimática sugiere que la biomasa previamente generada en MSM + RRB, cuando se transfiere a un medio con almidón como única fuente de carbono, puede efectivamente iniciar la producción de alfa-amilasas.

Esto indica que el almidón podría actuar como un inductor específico de la enzima, mientras que el MSM + RRB es más eficiente para la proliferación celular. Este estudio resalta la importancia de la composición del medio de cultivo no solo en términos de soporte del crecimiento bacteriano, sino también en la regulación de la expresión enzimática.

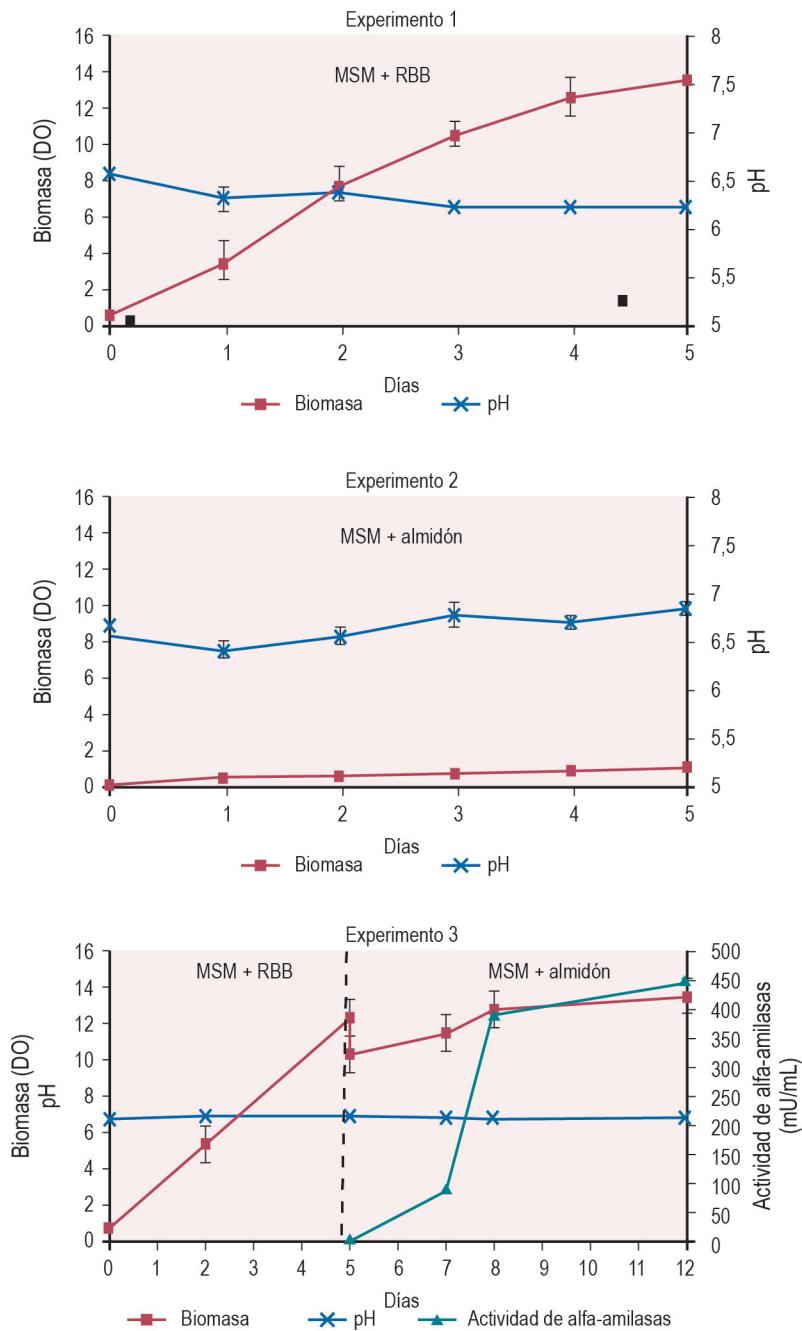


Figura 2. Evaluación de la producción biomasa y de alfa-amilasas de la cepa BMA1 en distintas condiciones de cultivos.

CONCLUSIONES

Los resultados evidenciaron que la cepa bacteriana aislada, BMA1, es capaz de producir alfa-amilasas cuando se sigue un bioproceso dividido en dos etapas. En la primera fase, se cultivó en un medio MSM + RRB (5% p/v) para promover el crecimiento y acumulación de biomasa. Posteriormente, la biomasa generada se transfirió a un medio MSM + almidón (1% p/v), donde se logró inducir la producción de alfa-amilasas. Para maximizar la producción de estas enzimas, será esencial implementar estrategias que optimicen las condiciones de cultivo en este bioproceso. Además, considerando el potencial biotecnológico de la cepa BMA1, será necesario avanzar en la caracterización genética mediante técnicas de biología molecular.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Conde Molina, D., Bogao, G., Tubio, G., & Corbino, G. (2023). Utilization of sweet potato root residues for the production of bacterial xylanases: a sustainable approach. *Jornadas de Ciencia y Tecnología 2023. AJEA (Actas De Jornadas Y Eventos Académicos De UTN)*, (26), 191-196. <https://doi.org/10.33414/ajea.1301.2023>
- Far, B. E., Ahmadi, Y., Khosroshahi, A. Y., & Dilmaghani, A. (2020). Microbial alpha-amylase production: progress, challenges and perspectives. *Advanced Pharmaceutical Bulletin*, 10(3), 350. <https://doi.org/10.34172/apb.2020.043>
- Farooq, M. A., Ali, S., Hassan, A., Tahir, H. M., Mumtaz, S., & Mumtaz, S. (2021). Biosynthesis and industrial applications of α-amylase: A review. *Archives of Microbiology*, 203, 1281-1292. <https://doi.org/10.1007/s00203-020-02128-y>
- Laurie, S.M., Bairu, M.W., & Laurie, R.N. (2022) Analysis of the nutritional composition and drought tolerance traits of sweet potato: selection criteria for breeding lines. *Plants*, 11, 1804. <https://doi.org/10.3390/plants11141804>
- McCleary, B.V., & McGeough, P. A. (2015). Comparison of polysaccharide substrates and reducing sugar methods for the measurement of endo-1,4 β -Xylanase. *Applied Biochemistry & Biotechnology*, 177, 1152–1163. <https://doi.org/10.1007/s12010-015-1803-z>

ESTRATEGIAS DE ENCAPSULACIÓN DE PRINCIPIOS ACTIVOS USANDO ALMIDÓN Y ALGINATO

Leiza D. Fernández¹, Paula F. González Seligra², Lucía M. Famá³.

¹ Universidad Nacional de San Martín, leisaqca@gmail.com

² Universidad Nacional del Oeste, IlyNT, pseligra@uno.edu.ar

³ Universidad de Buenos Aires, FCEN, Depto. de Física, IFIBA-CONICET, Argentina, lfama@df.uba.ar

RESUMEN

La encapsulación de compuestos activos en matrices biodegradables ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar la funcionalidad de materiales de envase a partir de lograr una liberación más controlada de los activos. En este estudio, se desarrollaron cápsulas utilizando mezclas de almidón carboxilado y alginato de sodio mediante gelificación iónica junto a una solución de cloruro de calcio al 1% p/v como agente entrecruzante, con la finalidad de contener extracto antioxidante de yerba mate. La mayor eficiencia de encapsulación se obtuvo empleando la mezcla de almidón al 3,5% y alginato al 1,5%, logrando la liberación más controlada del agente activo.

La incorporación de estas cápsulas en envases biodegradables es muy prometedora ya que se espera que puedan lograr controlar de mejor manera la liberación de agentes funcionales, mejorando la protección del alimento y prolongando su vida útil.

Palabras Clave: Encapsulación, Gelificación iónica, Extracto de yerba mate

INTRODUCCIÓN

Alrededor del 14% de los alimentos a nivel mundial se desperdicia tras la cosecha y antes de llegar al comercio minorista. Esta problemática ha incentivado el desarrollo de envases funcionales destinados a prolongar la vida útil de los productos alimentarios (Wongphan et al., 2024). Los envases activos con propiedades antioxidantes tienen la capacidad de prevenir o retrasar la oxidación de diversos productos (Deshmukh et al., 2022). Las películas a base de almidón pueden actuar como matrices protectoras de componentes activos, y en particular, el almidón carboximetilado ha mostrado gran capacidad para retener extractos naturales (Iacovone et al., 2024). La inclusión de extractos naturales, como el de yerba mate, en películas de almidón ha dado lugar a materiales con propiedades antioxidantes y ambientalmente amigables (Gómez-Bachar et al., 2024). Sin embargo, la incorporación directa de estos activos en la matriz produjo una liberación excesivamente rápida. Para solucionar este problema, la encapsulación se ha utilizado para estabilizar los activos en matrices poliméricas, facilitando una liberación controlada (Ortiz-Romero et al., 2021).

Una técnica comúnmente empleada para la encapsulación es la gelificación iónica, que implica la formación de gotas a partir de una mezcla del material de recubrimiento y el activo, las cuales

se introducen en una solución que contiene iones de calcio como reticulante (Ortiz-Romero et al., 2021; LupoPasin et al., 2012). El alginato de sodio es uno de los recubrimientos más utilizados por su alta reactividad con los iones de calcio, su versatilidad para encapsular sistemas hidrofóbicos e hidrofilicos, y por su bajo costo (LópezCórdoba et al., 2014). Deladino et al. (2008) encapsularon extracto de yerba mate en matrices de alginato y quitosano, observando que la inclusión de quitosano disminuyó el porcentaje de encapsulación; sin embargo, López-Córdoba et al. (2014) demostraron que la adición de almidón en matrices de alginato puede reducir la porosidad de la cápsula, logrando una liberación de polifenoles controlada.

OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo fue desarrollar una matriz estable y resistente mediante la combinación de diferentes proporciones de almidón y alginato para encapsular extracto acuoso de yerba mate utilizando la técnica de gelificación iónica, con el fin de obtener cápsulas con antioxidantes incorporados.

METODOLOGÍA

Obtención de extracto natural de yerba mate

Se mezcló 10 g de yerba mate (La tranquera, Argentina) con 100 ml de agua destilada y se calentó a baño maría a 80 °C con agitación constante durante 40 minutos. Posteriormente, se realizó un doble filtrado para obtener un extracto acuoso (Ceballos et al., 2020).

Determinación del contenido total de polifenoles del extracto de yerba mate

El contenido de polifenoles se determinó mediante el método de FolinCiocalteu (F-C) según Ceballos et. al (2020). Se disolvió extracto (400 µL) en agua destilada (15 mL). Luego, 400 µL de la solución se mezcló con 2 mL de reactivo de F-C (1:10) y 1,6 mL de carbonato de sodio (7% p/v). Se dejó reaccionar 30 min y se midió la absorbancia a 765 nm (Espectrofotómetro UV, Shimadzu UV-1800, Japón). Los resultados se compararon con una curva de calibración realizada con ácido gálico y se expresaron como equivalente de ácido gálico por unidad de masa del extracto (mgGAE/g).

Encapsulación de activos

Se prepararon 4 sistemas para emplear como cápsulas (Tabla 1). En todos los casos se partió de un gel de almidón carboximetilado en el extracto acuoso de yerba mate contenido ácido cítrico (AC) e hipofosfito de sodio (HS). Las cápsulas sin alginato de sodio se denominaron CS. Para las cápsulas con alginato-almidón, se reemplazó parte del almidón del gel de CS por diferentes proporciones de alginato (1 y 1,5% p/p, CS-A₁ y CS-A_{1,5}, respectivamente), y se agitó hasta su homogeneización. Finalmente, se evaluó el efecto del uso de plastificante en el sistema TPCS-A_{1,5}, incorporando glicerol en el gel inicial.

Las cápsulas se formaron por gelificación iónica goteando con una jeringa con aguja 22G los geles de la Tabla 1 sobre una solución acuosa de CaCl₂ al 1%p/v. Las cápsulas se dejaron estabilizar en las soluciones de entrecruzante durante 10 min con la finalidad de evaluar su estabilidad en ese medio.

Muestra	Almidón (% p/p)	Alginato (% p/p)	Glicerol (% p/p)	AC	HS
CS	5	0	0	0,5	0,25
CS-A ₁	4	1	0	0,4	0,2
CS-A _{1,5}	3,5	1,5	0	0,35	0,175
TPCS-A _{1,5}	3,5	1,5	0,5	0,35	0,175

Tabla 1. Formulaciones de los diferentes encapsulados. Capsulas sin alginato (CS), cápsulas con alginato (CS-A₁ y CS-A_{1,5}), cápsulas con alginato y glicerol (TPCS-A_{1,5}). Las concentraciones de los aditivos AC y HS varían en función a la concentración de almidón.

RESULTADOS

La Figura 1 muestra las cápsulas conteniendo extracto de yerba mate desarrolladas a partir de las mezclas de almidón carboxilado y alginato de sodio descritas en la Tabla 1 y utilizando la técnica de gelificación iónica.

El sobrenadante de los sistemas CS-A_{1,5} y TPCS-A_{1,5} fue analizado por el método Folin-Ciocalteu y CS-A_{1,5} demostró una menor concentración de polifenoles liberados.

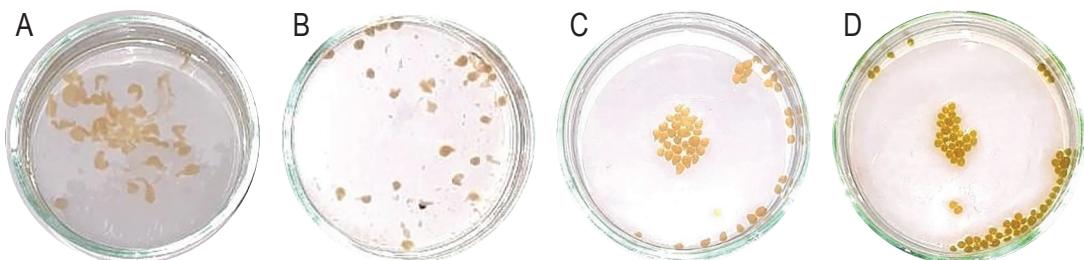


Figura 1. Imágenes de las cápsulas obtenidas por gelificación iónica. (A) Cápsulas sin alginato (CS), (B) con alginato al 1% (CS-A1), (C) con alginato al 1,5 % (CS-A1,5) y (D) con alginato al 1,5% y glicerol 0,5% (TPCS-A1,5).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El gel desarrollado con almidón como único polímero, CS, no logró formar cápsulas homogéneas (Fig. 1A). El empleo de la mínima concentración de alginato de sodio (CS-A₁) condujo a una mayor homogeneidad en la forma de los encapsulados y a una menor aglomeración de los mismos, respecto de CS (Fig. 1B). Los sistemas CS-A_{1,5} (Fig. 1C) y TPCS-A_{1,5} (Fig. 1D) lograron mayor resistencia y estabilidad en solución acuosa de CaCl₂, indicando que la presencia de alginato en relación 1,5% p/v fue fundamental para el armado de las cápsulas. Estos resultados son consistentes con la literatura para cápsulas de almidón (2%) con alginato (2%) contenido extracto de yerba mate (López-Córdoba et al., 2014). El empleo de glicerol como plastificante, no mostró un cambio relevante en la forma de las cápsulas, sólo en el color que se tornó más transparente (Fig. 1D).

El análisis del sobrenadante de los sistemas CS-A_{1,5} y TPCS-A_{1,5} mostró que el material más estable en la solución fue el conformado por almidón al 3,5% y alginato al 1,5%, liberando una menor concentración de polifenoles. El uso de glicerol aumentó la velocidad de liberación de los polifenoles en el tiempo, siendo la formulación CS-A_{1,5} la más prometedora para generar encapsulados de activos con posibilidades de incorporar en una matriz de almidón.

CONCLUSIONES

Se desarrollaron mezclas de almidón carboxilado y alginato de sodio en diferentes proporciones para encapsular activos. Utilizando la técnica de gelificación iónica, se fabricaron cápsulas conteniendo extracto antioxidante de yerba mate. Las cápsulas elaboradas con una proporción de 70:30 de almidón-alginato de sodio y sin la incorporación de glicerol resultaron ser las más estables y resistentes para contener el extracto de yerba mate, permitiendo una liberación controlada y prolongada del mismo.

Los resultados sugieren que la incorporación de cápsulas de almidónalginato con extracto de yerba mate en materiales a base de polímeros biodegradables, como el almidón, es una estrategia prometedora para el desarrollo de envases biodegradables, funcionales y de bajo costo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a UBACyT 2023, PICT 2019, PICT 2021 y PIP 2022-2024 por su financiación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ceballos, R. L., Ochoa-Yepes, O., Goyanes, S., Bernal, C., & Famá, L. (2020). Effect of yerba mate extract on the performance of starch films obtained by extrusion and compression molding as active and smart packaging. Carbohydrate Polymers, 244, 116495. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116495>.
- Deladino, L., Anbinder, P. S., Navarro, A., & Martino, M. N. (2008). Encapsulation of natural antioxidants extracted from *Ilex paraguariensis*. Carbohydrate Polymers, 71, 126–134. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.05.030>.
- Deshmukh, R. K., & Gaikwad, K. K. (2022). Natural antimicrobial and antioxidant compounds for active food packaging applications. Biomass Conversion and Biorefinery, 14(4), 4419-4440. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02623-w>.
- Gómez-Bachar, L., Vilcovsky, M., González-Seligra, P., & Famá, L. (2024). Effects of PVA and yerba mate extract on extruded films of carboxymethyl cassava starch/PVA blends for antioxidant and mechanically resistant food packaging. International Journal of Biological Macromolecules, 268(xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131464>.
- Iacovone, C., Guz, L., & Famá, L. (2024). Sustainable innovations in food packaging: Antioxidant basil-enriched cassava starch films with UV protection and enhanced water and mechanical resistance. Food Packaging and Shelf Life, 45, 101324. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2024.101324>.

López-Córdoba, A., Deladino, L., & Martino, M. (2014). Release of yerba mate antioxidants from corn starch-alginate capsules as affected by structure. *Carbohydrate Polymers*, 99, 150-157. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.08.026>.

Lupo-Pasin, B., González-Azón, C., & Maestro-Garriga, A. (2012). Microencapsulation in alginate for food. Technologies and applications. *Revista Venezolana Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 3(1), 130-151.

Ortiz-Romero, N., Ochoa-Martínez, L. A., González-Herrera, S. M., RutiagaQuiñones, O. M., & Gallegos-Infante, J. A. (2021). Avances en las investigaciones sobre la encapsulación mediante gelación iónica: una revisión sistemática. *Tecnológicas*, 24 (52), e1962. <https://doi.org/10.22430/22565337.1962>.

Wongphan, P., Promhuad, K., Srisa, A., Laorenza, Y., Oushapjalaunchai, C., & Harnkarnsujarit, N. (2024). Unveiling the Future of Meat Packaging: Functional Biodegradable Packaging Preserving Meat Quality and Safety. *Polymers*, 16(9), 1232. <https://doi.org/10.3390/polym16091232>.

REMOCIÓN DE CINC EN EFLUENTES ACUOSOS EMPLEANDO DIATOMITAS EN PROCESO SEMICONTINUO

Pablo S. Gauna¹, Sofía García Bado¹, Agustina Bentivoglio², Griselda L. Sosa^{2,3},
Helena M. Ceretti² y Silvana A. Ramírez²

¹ Instituto de Industria, Universidad Nacional de General Sarmiento, pgauna@campus.ungs.edu.ar

² Instituto de Ciencias, Universidad Nacional de General Sarmiento.

³ CONICET.

RESUMEN

La presencia de Zn(II) en el ambiente constituye un problema, pues afecta la calidad de aguas que pueden emplearse como fuente de consumo y la microbiota presente en ella, así como la flora, la fauna y a los seres humanos.

Dado que gran parte del Zn(II) vertido al ambiente proviene de efluentes líquidos generados por actividades industriales (minería, refinación de minerales, recubrimientos superficiales, producción de fertilizantes, curtiembres, etc.), resulta de interés orientar esfuerzos para minimizar la liberación del mismo.

Aquí se presentan los resultados preliminares del trabajo que tuvo como objetivo estudiar el uso de una columna semicontinua que emplea diatomitas, un material de origen natural y bajo costo, como adsorbente. También se exploraron algunas condiciones para la desorción del metal en modo de operación discontinuo o batch.

Palabras Clave: diatomitas, zinc, adsorción, desorción, proceso semicontinuo

INTRODUCCIÓN

El zinc es un elemento esencial para la vida de los seres humanos. Se encuentra presente naturalmente en el ambiente y también aparece como producto de actividades industriales. Por su carácter metálico, no se degrada por ninguna vía y puede acumularse en flora, fauna y suelo, llegando a humanos por la cadena alimentaria (Bohli et al., 2015; Mossa et al., 2020). Dependiendo del grado de exposición, puede provocar problemas agudos y crónicos en los sistemas gastrointestinal, respiratorio, cardiovascular y neurológico (Schoofs et al., 2024).

Los efluentes líquidos provenientes de actividades como minería, refinación de minerales, revestimiento de metales, producción de fertilizantes y curtiembres (Kumar et al., 2011) contribuyen en forma importante al ingreso del metal al ambiente, por lo cual es fundamental implementar un tratamiento adecuado para minimizar su impacto. Para ello, existen diversas posibilidades, por ejemplo, intercambio iónico, precipitación química, electrodialisis, ultrafiltración, oxidación-reducción y

ósmosis inversa. Ellas tienen en común altos costos operativos, la necesidad de una gran inversión inicial y/o una relativamente baja eficiencia para retener los metales nocivos para el ambiente (Fu & Wang, 2011).

Considerando el factor económico, el uso de adsorbentes naturales de bajo costo como las diatomitas constituye una alternativa interesante para el tratamiento de efluentes (Bilgin & Tulun, 2015; Caliskan et al., 2011; Flores-Cano et al., 2013; Piri et al., 2020). Básicamente las diatomitas son sílice amorfa que contienen óxidos de aluminio, hierro y metales alcalinos. Son materiales abundantes, no tóxicos y presentan buena capacidad de adsorción (Safa et al., 2012).

OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es explorar el uso de diatomitas como adsorbente de Zn(II) en una columna semicontinua y, evaluar la posibilidad de desorción en procesos batch.

METODOLOGÍA

Soluciones de Zn(II). Se preparó una solución madre de 1000 ppm y, a partir de ella, diluciones de 20 ppm para alimentar la columna semicontinua.

Cuantificación de Zn(II). Se realizó espectrofotométricamente tomando 1 mL de la solución que emerge de la columna, empleando el método de Zincón (U.S. Environmental Protection Agency (EPA), s. f.).

Adsorción de Zn(II) en columna semicontinua. Con una bomba peristáltica se hizo circular una solución de 20 ppm de Zn(II) a través de la columna con el adsorbente. A la salida de ésta se tomaron muestras a diferentes intervalos para cuantificar la concentración del metal (Figura 1). Se realizaron cuatro experimentos: con caudales de 5 y 20 mL·min⁻¹ y 2,70 y 3,30 g de diatomitas.

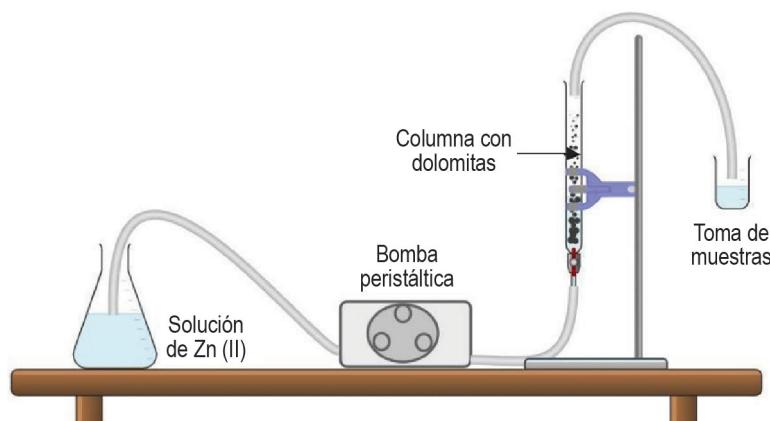


Figura 1: Esquema experimental para adsorción semicontinua de Zn (II).

Desorción de Zn(II). Se sumergieron tres porciones de 0,2500g de diatomitas, cada una en 25,00 mL de soluciones de Zn(II) con 5, 10 y 20 ppm. Tras una semana, se cuantificó el Zn(II) retido. Luego, se lavaron con agua destilada, se centrifugaron a 1500 RPM durante 15 minutos y se secaron durante 7 días a temperatura ambiente. A continuación, se sumergieron en 5,00 mL de HCl 1 M durante 30 minutos. Se tomaron alícuotas de 1,00 mL del sobrenadante para medir el Zn(II) desorbido.

RESULTADOS

La Figura 2 muestra las gráficas de concentración de salida de la columna para las diferentes condiciones de caudal y masa de adsorbente con las curvas de ajuste correspondientes. Por su parte, en la Tabla 1 se muestra el porcentaje de desorción de la diatomita con respecto a la cantidad de metal que tenía retenido.

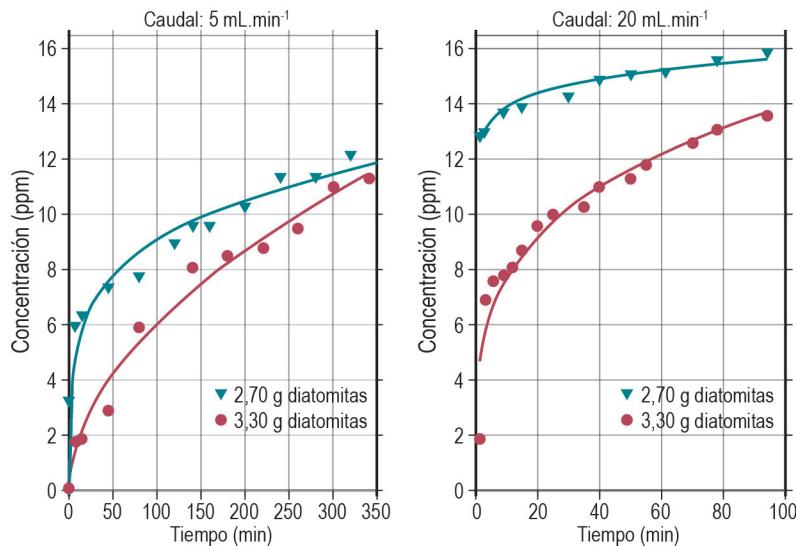


Figura 2. Concentración de Zn(II) a la salida de la columna semicontinua para distintas condiciones de caudal y de masa de adsorbente.

Tabla 1. Porcentaje de Zn(II) desorbido para distintos intervalos de metal retenido en adsorbente

masa _{Zn} retenido /masa _{diamonita} (mg/g)	% desorción
0,5-1,0	57 ± 2
1,0-1,5	85 ± 2
1,5-2,0	40,8 ± 0,6

ANÁLISIS

Adsorción

En la Figura 2, puede observarse que para los dos caudales analizados (5 y $20\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$) se obtiene la misma tendencia: con $2,70\text{ g}$ de adsorbente, se logra una concentración de salida más alta que para el caso con $3,30\text{ g}$ de diatomitas. Esta diferencia se debe a la cantidad del adsorbente que, ante la misma velocidad de flujo (igual tiempo de contacto) captura más metal, puesto que hay disponibles más sitios de adsorción en el sólido para la retención. Asimismo, para una cantidad de adsorbente dada, a menor caudal másico, la concentración de salida resulta más baja: esto se debe a que existe un mayor tiempo de contacto, lo cual posibilita la difusión del Zn(II) hacia la superficie y los poros del adsorbente.

Este comportamiento se cuantificó ajustando los datos para determinar la cantidad de Zn(II) adsorbido para cada condición evaluada. También se estimó la eficiencia de retención como la

relación entre el Zn(II) adsorbido y el total que circuló por la columna. El ajuste se realizó empleando una ecuación de la forma:

$$c = Kt^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

donde c es la concentración de la solución de Zn(II) que abandona la columna, t es el tiempo, K y n son constantes.

Los resultados sugieren que la mayor eficiencia de remoción del metal se obtiene con los caudales más bajos y la mayor cantidad de adsorbente (Tabla 2). En particular, en dichas condiciones se obtuvo en este trabajo una eficiencia de 63,5%. A los efectos comparativos, una columna que emplea carbón activado tiene una eficiencia de remoción de 65,0% para 5 mL/min (Kalavathy et al., 2010).

Caudal mL.min-1	Masa adsorbente (g)	Zn retenido (mg)	Eficiencia remo- ción (%)	Tiempo (min)	Masa adsorbida Zn / masa diatomitas (mg/g)
5	2,70	17,3	49,5	350,0	6,4
5	3,30	22,2	63,5	350,0	6,7
20	2,70	7,5	21,5	87,5	2,8
20	3,30	14,6	41,8	87,5	4,4

Tabla 2. Parámetros del estudio de la columna de adsorción

Desorción

Es posible observar en la Tabla 1 que, independientemente de la cantidad de metal que tenga retenido el adsorbente, se logra un porcentaje de desorción superior al 40% del zinc, alcanzando los mejores valores cuando se tiene entre 1,0 y 1,5 mg_{Zn}/g_{diatomita}. Estos resultados preliminares indican que la desorción del catión metálico es posible con HCl 1M, en el intervalo de concentraciones estudiado.

CONCLUSIONES

Los experimentos realizados permitieron seleccionar condiciones de operación (flujo, caudal, volumen de líquido, masa de adsorbente, etc.) para estudiar cómo se correlacionan las variables en una columna semicontinua que emplea diatomeas como adsorbente, un material de origen natural y bajo costo. La eficiencia de remoción de cinc obtenida resultó comparable a la del carbón activado como adsorbente.

Los resultados preliminares empleando HCl 1M indican que es posible la desorción del cinc de las diatomitas. Este hecho resulta interesante para una potencial reutilización del adsorbente en la columna o la recuperación del metal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bilgin, M., & Tulun, S. (2015). Use of diatomite for the removal of lead ions from water: Thermodynamics and kinetics. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 29(4), 696-704. <https://doi.org/10.1080/13102818.2015.1039059>

- Bohli, T., Ouederni, A., Fiol, N., & Villaescusa, I. (2015). Single and binary adsorption of some heavy metal ions from aqueous solutions by activated carbon derived from olive stones. *Desalination and Water Treatment*, 53(4), 1082-1088. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.859099>
- Caliskan, N., Riza Kul, A., Alkan, S., Sogut, E. G., & Alacabey, İ. (2011). Adsorption of Zinc(II) on diatomite and manganese-oxide-modified diatomite: A kinetic and equilibrium study. *Journal of Hazardous Materials*, 193, 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.06.058>
- Flores-Cano, J. V., Leyva-Ramos, R., Padilla-Ortega, E., & Mendoza-Barron, J. (2013). Adsorption of Heavy Metals on Diatomite: Mechanism and Effect of Operating Variables. *Adsorption Science & Technology*, 31(2-3), 275-291. <https://doi.org/10.1260/0263-6174.31.2-3.275>
- Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 407-418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
- Kalavathy, H., Karthik, B., & Miranda, L. R. (2010). Removal and recovery of Ni and Zn from aqueous solution using activated carbon from Hevea brasiliensis: Batch and column studies. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 78(2), 291-302. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2010.03.014>
- Kumar, J., Balomajumder, C., & Mondal, P. (2011). Application of Agro-Based Biomasses for Zinc Removal from Wastewater—A Review. *CLEAN—Soil, Air, Water*, 39(7), 641-652. <https://doi.org/10.1002/clen.201000100>
- Mossa, A.-W., Young, S. D., & Crout, N. M. (2020). Zinc uptake and phyto-toxicity: Comparing intensity-and capacity-based drivers. *Science of the Total Environment*, 699, 134314. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134314>
- Piri, M., Sepehr, E., Samadi, A., Farhadi, K., & Alizadeh, M. (2020). Application of diatomite for sorption of Pb, Cu, Cd and Zn from aqueous solutions: Kinetic, thermodynamic studies and application of response surface methodology (RSM). *Water Environment Research*, 93(5), 714-726. <https://doi.org/10.1002/wer.1377>
- Safa, M., Larouci, M., Meddah, B., & Valemens, P. (2012). The sorption of lead, cadmium, copper and zinc ions from aqueous solutions on a raw diatomite from Algeria. *Water Science and Technology*, 65(10), 1729-1737. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.183>
- Schoofs, H., Schmit, J., & Rink, L. (2024). Zinc Toxicity: Understanding the Limits. *Molecules*, 29(13), 3130. <https://doi.org/10.3390/molecules29133130>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (s. f.). Method 7387: Determination of Cyanide by Microdistillation and Flow Injection Analysis, Gas Diffusion, Amperometric Detection. https://www.neml.gov/methods/method_summary/7387/

EFFECTO DEL CONTENIDO DE TITANIO EN ÓXIDOS MIXTOS COMO FOTOCATALIZADORES DE COLORANTES AZOICOS

Edward Peraza^{1,2}, Georgina Ortenzi^{1,2}, y Candelaria Leal Marchena^{1,2,*}

¹ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Av. Cruz Roja Argentina esquina Maestro López, CP5000, Córdoba Capital, Córdoba, Argentina.

² Centro de Investigación y Tecnología Química, Universidad Tecnológica Nacional, CONICET, FRC, Av. Cruz Roja Argentina esquina Maestro López, CP5000, Córdoba Capital, Córdoba, Argentina.

*Autora a quien la correspondencia debe ser dirigida: cleal@frc.utn.edu.ar

RESUMEN

Se desarrollaron y sintetizaron niobatos de potasio parcialmente sustituidos con titanio, $\text{KNb}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ ($x=1, 0.8, 0.6, 0.5$) con estructura tipo perovskita, el mediante método de citrato. La sustitución parcial del catión B permite extender la respuesta de la luz y mejora la actividad fotocatalítica. Los materiales se caracterizaron mediante técnicas físico-químicas: Difracción de Rayos X, Espectroscopía de Reflectancia Difusa UV-Vis, y área superficial específica. Su desempeño photocatalítico se evaluó en la degradación de un colorante azoico representativo, naranja de metilo.

Para las perovskitas sustituidas con titanio se observó una ligera disminución en los valores de band-gap en comparación con el KNbO_3 no sustituido. Después de 240min bajo irradiación, la eficiencia de la decoloración en los ensayos con naranja de metilo alcanzó valores superiores al 65%. El mayor desempeño photocatalítico en la decoloración del naranja de metilo fue para el $\text{KNb}_{0.6}\text{Ti}_{0.4}\text{O}_3$ y se atribuyó a la disminución en el valor de band-gap, el tamaño del cristal y la estructura de perovskita cristalina, lo que permitiría desarrollar una estrategia simple para sintetizar materiales photocatalíticos activos.

Palabras Clave: Perovskitas, fotocatálisis, niobatos sustituidos, colorantes azoicos.

ABSTRACT

Partially titanium-substituted potassium niobates, $\text{KNb}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ ($x=1, 0.8, 0.6, 0.5$), with a perovskite-like structure were developed and synthesized by the citrate method. Partial substitution of the B cation extends light response and enhances photocatalytic activity. The materials were characterized using physicochemical techniques: X-ray Diffraction, UV-Vis Diffuse Reflectance Spectroscopy, and specific surface area analysis. Their photocatalytic performance was evaluated for the degradation of a representative azo dye, methyl orange.

For titanium-substituted perovskites, a slight decrease in band-gap values was observed compared to unsubstituted KNbO_3 . After 240 min under irradiation, the decolorization efficiency in the methyl orange assays reached values above 65%. The highest photocatalytic performance in methyl orange decolorization was for $\text{KNb}_{0.6}\text{Ti}_{0.4}\text{O}_3$ and was attributed to the decrease in band-gap value, crystal size and crystalline perovskite structure, which would allow developing a simple strategy to synthesize active photocatalytic materials.

Keywords: Perovskites, photocatalysis, substituted niobates, azo dyes. niobatos sustituidos, colorantes azoicos.

INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales coloreadas con tintes textiles que son vertidos sin ningún tratamiento en los cursos de agua tienen un impacto negativo y contaminante en el ambiente. La fotocatálisis heterogénea asistida por semiconductores es considerada una de las técnicas más prometedoras para la eliminación de estos contaminantes, dado que es posible convertirlos en especies menos dañinas, e inclusive llegar a la completa mineralización de los mismos, obteniéndose CO_2 y H_2O como productos finales (Shi et al., 2020).

Los óxidos mixtos de tipo perovskita ABO_3 han demostrado ser excelentes photocatalizadores (Grabowska, 2016), en particular, las perovskitas basadas en niobio (Liu et al., 2007). Las perovskitas presentan buenas propiedades photocatalíticas y pueden ajustarse fácilmente sustituyendo con un elemento diferente en el sitio A y/o B. La sustitución del catión B en las perovskitas se emplea generalmente en la fotocatálisis para extender la respuesta a la luz y mejorar la actividad photocatalítica (Tsai et al., 2013). Es bien sabido que la sustitución parcial del catión B modifica el tamaño de partícula, la nanoestructura y la estructura electrónica. Debido a su capacidad para promover la conductividad electrónica e iónica, y con ello mejorar el rendimiento catalítico de las perovskitas, el titanio ha sido ampliamente utilizado en la sustitución parcial del catión B (Nuvula et al., 2018).

Este trabajo tiene por objetivo la síntesis de niobatos de potasio parcialmente sustituidos con titanio $\text{KNbXTi}_1\text{-XO}_3$ ($x=1, 0.8, 0.6, 0.5$) con estructuras tipo perovskita para emplearse como nuevos catalizadores heterogéneos en la fotodegradación del colorante azoico naranja de metilo (MO).

METODOLOGIA

Síntesis de catalizadores

El KNbO_3 se obtuvo empleando el método de citrato, mezclando una solución acuosa de acetato de potasio a temperatura ambiente con una cantidad estequiométrica de NbCl_5 previamente disuelto en H_2O_2 . Luego, se agregó ácido cítrico bajo agitación constante. Para los niobatos de titanio sustituidos, se agregó la cantidad correspondiente de $\text{Ti}(\text{OC}_4\text{H}_9)_4$ inmediatamente después de agregar ácido cítrico. Se formó una solución pálida de color amarillo y se calentó a 80°C durante 4 h hasta la formación de un gel. Luego, se secó en un horno estático con vacío y finalmente se calcinó a 600°C durante 10 h.

Caracterización

Los materiales obtenidos se caracterizaron mediante Difracción de Rayos X (XRD) empleando un difractograma Rigaku y radiación $\text{CuK}\alpha$ de longitud de onda 0.15418\AA . Los datos de difracción se recogieron entre $2\theta = 10\text{--}70^\circ$ y velocidad de 2° por min. Las fases se identificaron comparando los patrones de difracción con los de referencia EVA. También se realizó Espectroscopia de Reflectancia Difusa (DRS UV-vis), utilizando un espectrofotómetro JASCO V650 UV-Vis con cámara de reflectancia difusa con esfera integrada de 50mm de diámetro. Los espectros se registraron en el rango de 200-800nm de longitud de onda. Por otro lado, el área superficial específica (S_{BET}) se determinó empleando un TriStar II3020. Previamente a las mediciones, las muestras se desgasificaron a 300°C durante 2h.

Evaluación fotocatalítica

La actividad catalítica se evaluó en la fotodegradación de una solución $8 \cdot 10^{-5}$ mol. L⁻¹ de MO con 200 mg de catalizador. Las pruebas se llevaron a cabo empleando una lámpara de mercurio de alta presión de 125W colocada dentro de una camisa de vidrio termostatizada e inmersa en la solución. Durante el transcurso de los ensayos, se tomaron muestras periódicamente, se filtraron y se analizaron mediante un espectrofotómetro de doble haz UV-visible PerseeT7DS a la longitud de onda de máxima absorbancia determinada previamente ($\lambda = 464\text{nm}$).

RESULTADOS Y ANÁLISIS

El patrón de difracción del KNbO₃ (Figura 1) presenta señales nítidas indicativas de una estructura cristalina y características de estructura de tipo perovskita ortorrómica con presencia de K₂Nb₁₆O₄₁ y K₂CO₃ como fases segregadas. La presencia de fases segregadas ha sido reportada previamente (Ushikubo, 2000), debido a que el óxido de niobio puede reaccionar fácilmente con muchos otros óxidos para formar fases de óxido mixto con estructuras complejas activas. Con el aumento en la sustitución por titanio, se observa una disminución en la intensidad de los picos, volviéndose ligeramente más anchos, lo que indica una pérdida de cristalinidad. Para KNb_{0,8}Ti_{0,2}O₃, se mantiene la estructura ortorrómica, con ausencia de picos de difracción atribuidos a fases segregadas.

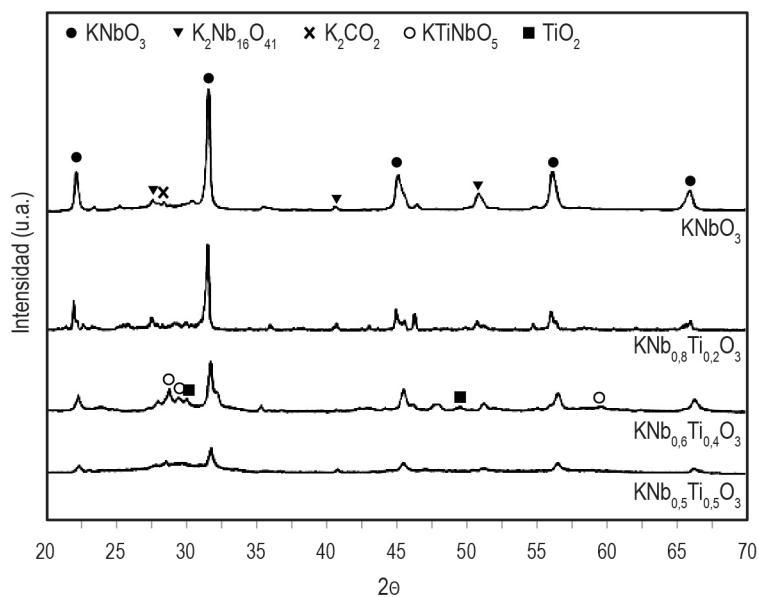


Figura 1. Patrones de XRD de los materiales.

Con el aumento del contenido de Ti, disminuye la intensidad de los picos y aparecen nuevas fases segregadas identificadas como KTiNbO₅ ortorrómica y TiO₂ ($2\theta = 31,8$ y $48,5^\circ$). Para la muestra con $x=0,5$, no se obtiene la estructura perovskita cristalina. Se ha informado que una estructura ordenada de fotocatalizadores estabiliza los fotones exhibidos en la actividad catalítica, por lo que la cristalinidad es una característica necesaria de obtener (Sadeq et al., 2019). El tamaño de cristal (DC) de los catalizadores se estimó mediante la ecuación de Debye Scherrer usando la señal de difracción a 31° , y los resultados se detallan en la Tabla 1. Se ha reportado que tamaños de

cristales más grandes están asociados a fases más cristalinas (Pecchi et al., 2013), por lo tanto, la disminución en el tamaño de cristal con la creciente sustitución de titanio puede estar asociada con la inserción de Ti^{4+} en la red cristalina de $KNbO_3$ disminuyendo su cristalinidad.

Los valores bajos de área superficial específica (S_{BET}) (Tabla 1) son similares a los valores informados para este tipo de material (Nuvula et al., 2018) sin una tendencia clara en la sustitución de Ti, y con valores esperados para estos tipos de estructuras cristalinas.

Catalizador	D_c (nm)	S_{BET} ($m^2 g^{-1}$)	E_g (eV)
$KNbO_3$	22	7.5	3.11
$KNb_{0.8}Ti_{0.2}O_3$	21	7.5	2.98
$KNb_{0.6}Ti_{0.4}O_3$	19	8.8	2.90
$KNb_{0.5}Ti_{0.5}O_3$	19	8.7	2.93

Tabla 1. Área superficial, tamaño de cristal y band-gap de los catalizadores.

En la Figura 2, el espectro DRS UV-Vis muestra un máximo a 260nm, característico de Nb-O-Nb, seguido de una banda entre 280–360nm atribuida a un octaedro de NbO_6 ligeramente distorsionado característico de los óxidos tipo perovskita. Con el aumento de la sustitución de Ti, la banda a 280nm anteriormente detallada, se ensancha por la superposición con la asignada a la transferencia de electrones desde el ligando-oxígeno a un orbital desocupado del Ti^{4+} , indicativo de la presencia de especies de Ti en las estructuras. Adicionalmente, solo para el catalizador $KNb_{0.6}Ti_{0.4}O_3$, aparece una banda centrada en 295nm atribuida a las transiciones electrónicas desde la banda de valencia por orbitales 2p del oxígeno a la banda de conducción de los orbitales 3d vacíos de Ti (García-López et al., 2015).

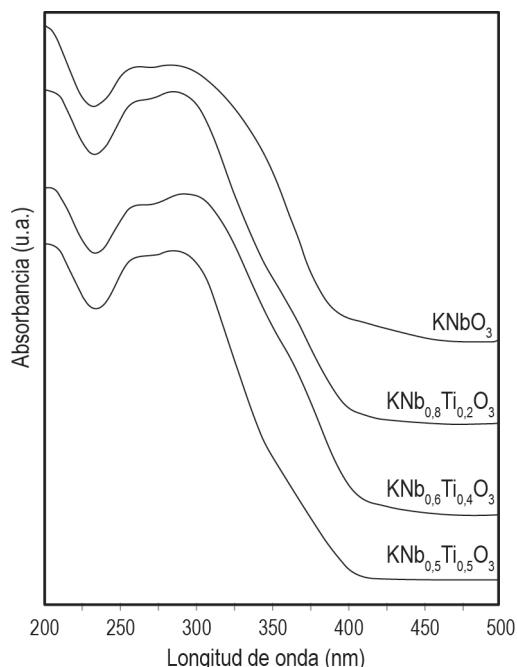


Figura 2. Espectros DRS UV-Vis.

Los valores de band-gap (E_g) de los catalizadores que se muestran en la Tabla 1 se estimaron utilizando la función de remisión de Kubelka-Munk. El valor de E_g más alto se obtuvo para KNbO_3 y se observa una ligera disminución tras sustituciones de Ti para los catalizadores $x=0.8$ y $x=0.6$ atribuidos a las especies de Ti^{3+} reducidas y las vacancias de oxígeno en los catalizadores. Para el mayor sustituido ($x=0.5$) el valor de E_g no sigue esta tendencia debido a la estructura menos cristalina.

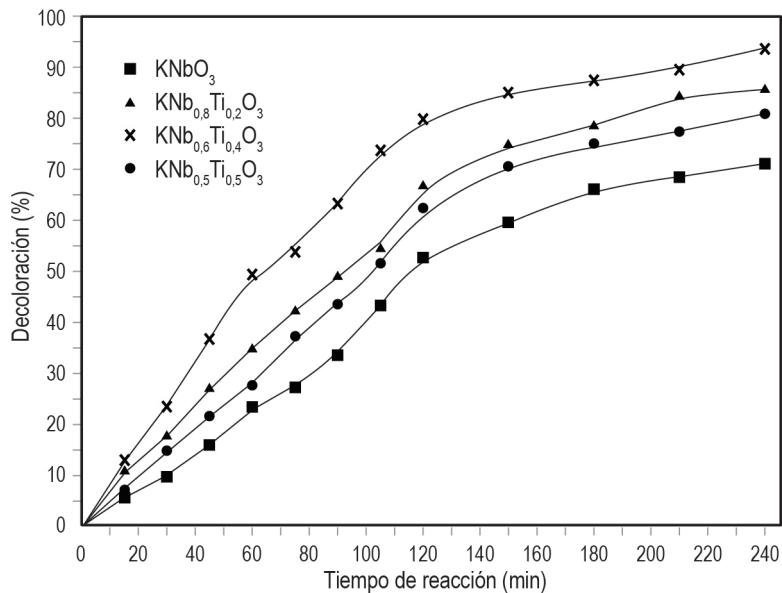


Figura 3. Decoloración (%) en función del tiempo.

En la Figura 3, se observa que la sustitución de Ti aumenta la fotoactividad de KNbO_3 , siendo el $\text{KNb}_{0.6}\text{Ti}_{0.4}\text{O}_3$ el que muestra mayor decoloración en los ensayos con MO. Este resultado puede atribuirse a la disminución del tamaño del cristal (D_c) que mejora las distancias de difusión de los huecos fotogenerados desde el centro hasta los sitios de reacción de la superficie, generando un aumento en el número de huecos que alcanzan los sitios de reacción (Zhang, 2013). Se ha reportado para sistemas de niobio, una mejora en la actividad redox relacionada con el oxígeno puente que se genera entre Nb-O-Ti (Barboza López y Castro, 2020). Por lo tanto, para $x=0.8$ y $x=0.6$, el aumento en la actividad photocatalítica puede correlacionarse con la sustitución de Ti que favorece que los defectos intrínsecos desarrollen la capacidad de desempeñar un papel como estados intermedios de energía, promoviendo una disminución o inhibición en la velocidad de recombinación e^-h^+ . Se observa un comportamiento diferente para el catalizador con mayor sustitución ($x=0.5$); la presencia de fases segregadas y la desaparición de la estructura perovskita podrían explicar la disminución en la fotoactividad.

CONCLUSIONES

Se sintetizaron exitosamente niobatos de potasio con estructura tipo perovskita parcialmente sustituidos con titanio mediante el método de citrato y se emplearon como fotocatalizadores en la degradación del colorante azoico naranja de metilo. Los resultados de la caracterización indican que el intervalo de energía de banda de los catalizadores sustituidos con Ti (<2.98 eV) aumenta la eficiencia de decoloración, alcanzando valores superiores al 65% después de 240min de irradiación.

La mayor fotoactividad de $\text{KNb}_{0.6}\text{Ti}_{0.4}\text{O}_3$ se atribuye a una disminución del intervalo de banda, el tamaño del cristal y la presencia de la estructura cristalina, lo que permitiría desarrollar una estrategia simple para sintetizar materiales photocatalíticos activos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBOZA LÓPEZ, A.; CASTRO, I. (2020). "Niobium-Titanium-Based Photocatalysts: Its Potentials for Free Cyanide Oxidation in Residual Aqueous Effluent". *Frontiers in Chemistry* 8, 99. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00099>
- GARCÍA-LÓPEZ, E.; MARCÌ, G.; MEGNA, B.; PARISI, F.; ARMELAO, L.; TROVARELLI, A.; BOARO, M.; PALMISANO, L. (2015). "SrTiO₃-based perovskites: preparation, characterization and photocatalytic activity in gas–solid regime under simulationd solar irradiation". *Journal of Catalysis* 321, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2014.10.014>
- GRABOWSKA, E. (2016). "Selected perovskite oxides: characterization, preparation and photocatalytic properties - A review". *Applied Catalysis B: Environmental* 186, 97–126. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.12.035>
- LIU, J.; CHEN, G.; LI, Z.; ZHANG, Z. (2007). "Hydrothermal synthesis and photocatalytic properties of ATaO₃ and ANbO₃ (A=Na and K)". *International Journal of Hydrogen Energy* 32, 2269–2272. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.10.005>
- NUVULA, S.; SAGAR, T.; VALLURI, D.; PRASAD, P. (2018). "Selective substitution of Ni by Ti in LaNiO₃ perovskites: a parameter governing the oxycarbon dioxide reforming of methane". *International Journal of Hydrogen Energy* 43, 4136–4142. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.180>
- PECCHI, G.; CABRERA, B.; BULJAN, A.; DELGADO, E.; GORDON, A.; JIMENEZ, R. (2013). "Catalytic oxidation of soot over alkaline niobates". *Journal of Alloys and Compounds* 551, 255–261. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.10.015>
- SADEQ, Z.; MAHDI, Z.; HAMZA, A. (2019). "Low cost, fast and powerful performance interfacial charge transfer nanostructured Al₂O₃ capturing of light photocatalyst eco-friendly system using hydrothermal method". *Materials Letter* 254, 120-124. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.07.050>
- SHI, J.; HUANG, W.; ZHU, H.; XIONG, J.; BEI, H.; WEI, X.; WANG, S. (2020). "Modified TiO₂ particles for heterogeneous photocatalysis under solar irradiation". *Materials Letter* 279, 128472. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128472>
- TSAI, C.; CHEN, L.; YEH, T.; TENG, H. (2013). "In situ Sn²⁺-incorporation synthesis of titanate nanotubes for photocatalytic dye degradation under visible light illumination". *Journal of Alloys Compounds* 546, 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.08.081>
- USHIKUBO, T. (2000). "Recent topics of research and development of catalysis by niobium and tantalum oxides". *Catalysis Today* 57, 331–338. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(99\)00344-2](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(99)00344-2)
- ZHANG, D. (2013). "Decomposition of rhodamine 6G in the presence of titania coupling coupled with carbon source as photocatalyst under visible light excitation". *High Energy Chemistry* 47, 177–181. <https://doi.org/10.1134/S0018143913040139>

USO DE LA *ULVA LACTUCA* PARA EL TRATAMIENTO SUSTENTABLE DE EFLUENTES CON NIQUEL

Miretti, Nina M¹; Torres Meza, Lucía¹; Ardanza, M. del Pilar^{1,2}; Piol, M. Natalia¹; Boeykens, Susana P.¹

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, IQAI – LaQuíSiHe, Argentina, laquisihe@fi.uba.ar

² UTN-FRSC, Laboratorio de Integridad de Materiales y Corrosión

RESUMEN

La presencia de Zn(II) en el ambiente constituye un problema, pues afecta la calidad de aguas qAlgunos residuos pueden convertirse en materiales adsorbentes para eliminar contaminantes, como la *Ulva lactuca*, un alga patagónica considerada plaga en la Provincia de Santa Cruz. En colaboración entre las Facultades de Ingeniería UBA-FI y UTN-FRSC, se planteó utilizar este recurso como adsorbente no convencional de metales. La *Ulva lactuca* se caracterizó por FTIR, TXRF y SEM-EDS revelando los posibles sitios activos para la adsorción y la ausencia inicial de impurezas, lo que sugiere su potencial como adsorbente de bajo costo. Se realizaron ensayos de dosaje para la adsorción de níquel. La investigación abre nuevas preguntas y motiva a continuar estudiando el uso de *Ulva lactuca* en reactores para el tratamiento de efluentes con metales. Se obtuvo un porcentaje de remoción de Ni (II) del 90,6 %.

Palabras Clave: tratamiento sustentable de efluentes, adsorción, *Ulva lactuca*, níquel (II).

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la biosorción se considera uno de los métodos más prometedores para la eliminación de iones metálicos en efluentes acuosos, debido a sus características de bajo costo y amigables con el medio ambiente [1]. Diferentes autores proponen el empleo de sustratos biológicos, por ejemplo: fibra de coco, hojas de té de desecho, algas marinas como adsorbentes para proporcionar un tratamiento eficaz y sostenible de efluentes industriales.

Para este trabajo se seleccionaron algas marinas (*Ulva lactuca*) extraídas de Punta Loyola, Provincia de Santa Cruz Argentina. El uso de algas para adsorber metales es un tratamiento eficaz y respetuoso con el medio ambiente y ha atraído una amplia atención de la investigación [2]. La *Ulva lactuca* es conocida comúnmente como lechuga de mar o luche verde, crece en la zona intermareal de la mayoría de los océanos del mundo y es una de las especies más desarrollada en las costas de la Provincia de Santa Cruz [3].

OBJETIVO

Estudiar el uso sustentable de *Ulva lactuca* como posible material de relleno en reactores para el tratamiento no convencional de efluentes que contiene níquel (II).

METODOLOGIA

Se seleccionaron algas marinas (*Ulva lactuca*) en Punta Loyola, Provincia de Santa Cruz Argentina. Se lavaron con agua destilada hasta que la solución resultante no tuviera color. Posteriormente, se secaron en estufa a 60°C durante 24 horas. Se molió y tamizó con malla número 16 y 35 (tamaño de partícula entre 1,3 – 0,5 mm).

Se realizó un ensayo de liberación de impurezas medido por TXRF (fluorescencia de rayos X por reflexión total) para conocer si los principales iones liberados por el material podrían influir en el proceso adsorptivo o pudieran ser contaminantes.

Para caracterizar el material se realizó un análisis topográfico superficial del material con un SEM Zeiss EVO MA 10. El equipo cuenta con un detector de electrones secundarios (SE1) y un espeíctrómetro dispersivo en energía (EDS). La preparación de las muestras se realizó de la siguiente manera, primero se secaron a 60°C en estufa. Se utilizó el Metalizador Sputtering Q150RES (Quorum Technologies Ltd) para recubrir las muestras con oro de manera uniforme en alto vacío. Se procesaron las micrografías con los programas ImageJ y SmartSEM®.

Se realizó la experiencia de saturación en el sistema *Ulva lactuca*-Ni (II). Para ello, se puso en contacto cantidades crecientes de adsorbente (0.1 g, 0.4 g, 0.7 g, 1.0 g y 1.3 g) con 50 mL de solución sintética de cada metal en recipientes de 100 mL, agitando a 200 rpm con agitador orbital (Marca Vicking®), durante 3 horas para que el sistema alcanzara el equilibrio. El contenido de metales se determinó mediante espectrometría de absorción atómica (XPLORAA GBC) llama aire-acetileno.

Para el sistema *Ulva lactuca*-Ni (II) se le realizó un microanálisis superficial (SEM-EDS) para detectar al níquel en la superficie. Para identificar los grupos funcionales presentes y los posibles sitios activos involucrados en el proceso de adsorción, se analizaron los sistemas antes y después de los ensayos de saturación mediante FT-IR. (Infrarrojo por Transformada de Fourier- Nicolet 8700).

Para obtener las isotermas de adsorción del sistema *Ulva lactuca*-Ni (II) se puso en contacto, en recipientes de 100 mL, dosis constantes de 0,1 g de *Ulva lactuca* con 50 mL de soluciones de concentraciones sintéticas iniciales de Ni (II) entre 1 y 6 mM. Luego de someter los reactores a agitación constante por 24 horas, la concentración del soluto en equilibrio (Ce) fue medida mediante espectrometría de absorción atómica (XPLORAA GBC) con llama aire-acetileno.

RESULTADOS

En la superficie del material se encontró un 44,26 % de cavidades irregulares (área) y otra zona formada por montículos que presentan diferentes diámetros y áreas (Fig. 1). El análisis topográfico superficial reveló la heterogeneidad de la superficie.

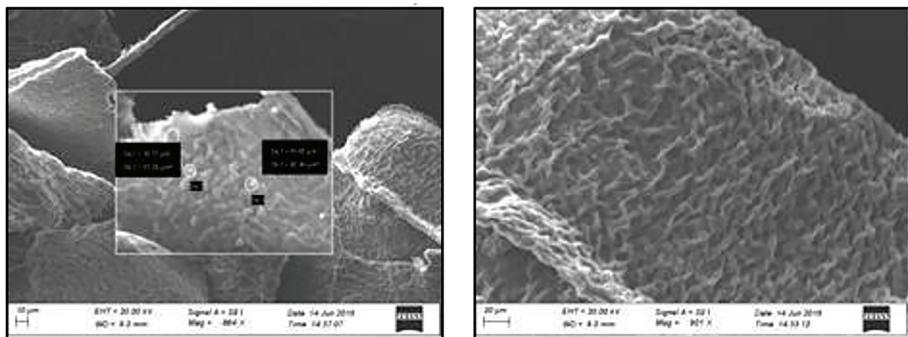


Figura 1: Heterogeneidad de la superficie de la *Ulva lactuca* antes del proceso de adsorción con Ni (II). Imagen izquierda Mag: 864 X y derecha Mag: 901 X. Detector SE1

Se realizó un microanálisis superficial multipunto del sistema alga sin adsorbato. Los resultados de los espectros dan cuenta de la composición superficial teniendo al carbono y al oxígeno como elementos mayoritarios. Los elementos minoritarios de todas las muestras fueron los esperados (aluminio, silicio, azufre, cloro, potasio, calcio, hierro, bromo y magnesio).

Los resultados obtenidos por TXRF para ensayos de liberación de impurezas muestran que los principales iones liberados por la *Ulva lactuca* son (en mg g⁻¹ de adsorbente): azufre 2,64, magnesio 1,49, calcio 1,06, aluminio 0,39, hierro 0,31, potasio 0,31, níquel por debajo del límite de cuantificación.

El ensayo de adsorción para el sistema *Ulva Lactuca-Ni* (II) mostró un porcentaje de remoción de 90,6 % de Ni (II) (Fig. 2) y el máximo de capacidad de adsorción se logra con 0,1 g de adsorbente.

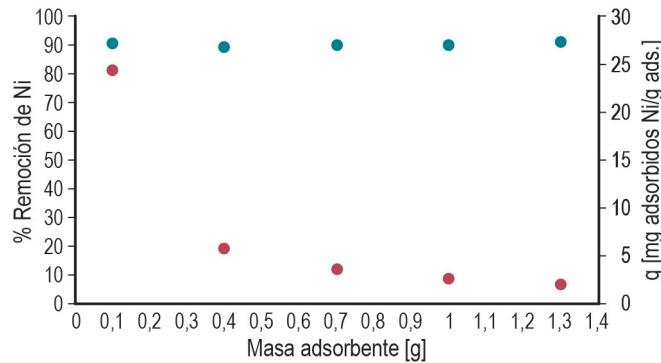


Figura 2: Curva de dosaje para el sistema *Ulva Lactuca-Ni* (II)

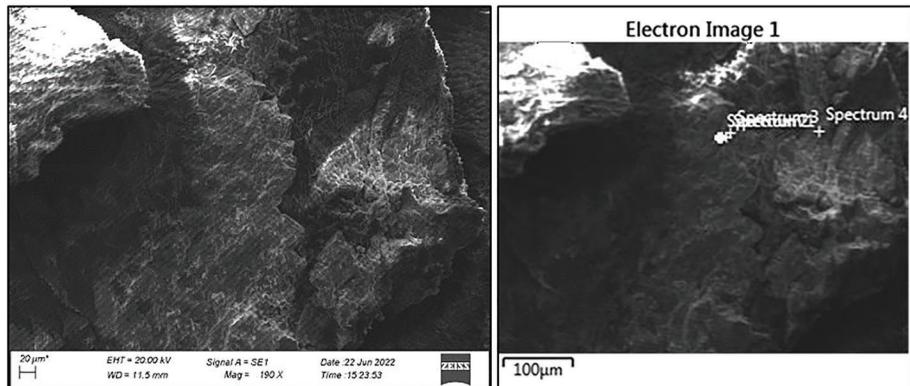


Figura 3: Heterogeneidad de la superficie sistema *Ulva Lactuca-Ni* (II). Imagen izquierda Mag: 190 X, Detector SE1 y derecha se muestra la zona del microanálisis superficial.

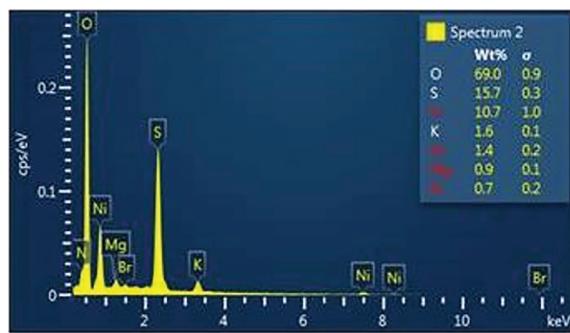


Figura 4: microanálisis superficial (SEM-EDS). Espectro puntual de la superficie sistema *Ulva Lactuca-Ni* (II).

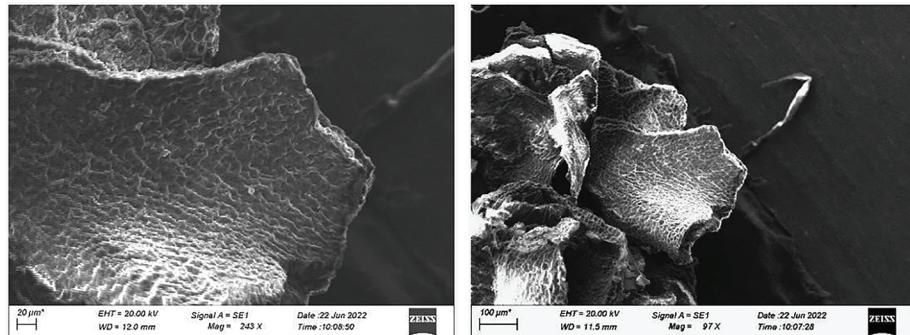


Figura 5: Sistema *Ulva lactuca-Ni* (II) (II). Imagen izquierda Mag: 243 X y derecha Mag: 97 X. Detector SE1

Las especies de macroalgas verdes (Chlorophyta) del género *Ulva* contiene ulvan que es un polisacárido de la pared celular compuesto principalmente por ramnosa sulfatada, ácidos urónicos

y xilosa. También presenta otros tres polisacáridos en su pared celular, la celulosa, xiloglucano y glucuronano [5].

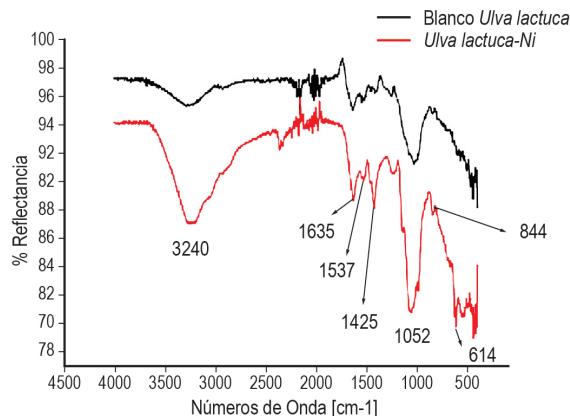


Figura 6: Espectro FT-IR del sistema blanco *Ulva Lactuca* y *Ulva Lactuca-Ni* (II).

Con la técnica FT-IR se identificaron los posibles grupos funcionales responsables del proceso adsorptivo debido a los cambios de intensidad antes y después de la adsorción, se cree que esto se debe al cambio del entorno del grupo funcional por la interacción con los iones metálicos. Los picos entre $850\text{-}550\text{ cm}^{-1}$ y $690\text{-}515\text{ cm}^{-1}$ se les puede atribuir a la presencia de halogenuros de alquilo ($\text{C}-\text{Cl}$, $\text{C}-\text{Br}$). El pico alrededor de 1050 cm^{-1} se atribuye al alargamiento del enlace CO de carboxilos y alcoholes. El pico encontrado alrededor de 1440 cm^{-1} se atribuye a un solapamiento de los picos correspondientes al alargamiento de los grupos N-H (de aminas) y O-H (de alcoholes). Los picos entre $2300\text{-}2200\text{ cm}^{-1}$ se les puede atribuir a los grupos $\text{C}\equiv\text{N}$ (nitrilos). La presencia de grupos amida se refleja en los picos encontrados entre $1670\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ ($\text{C}=\text{O}$ de amidas). Los grupos sulfonatos presentes en el material dan lugar a dos picos entre 1300 cm^{-1} y 1240 cm^{-1} la presencia de azufre aparece en el microanálisis superficial SEM-EDS (Fig. 3 y 4). La señal entre 3000 cm^{-1} y 3500 cm^{-1} se puede atribuir a los grupos O-H (de alcoholes y fenoles).

Los modelos de Langmuir (1918) y Freundlich (1906) son los más utilizados y citados en la literatura para describir isotermas de adsorción. Estos modelos proporcionan una idea del mecanismo de adsorción, las propiedades superficiales, así como el grado de afinidad del adsorbente [6].

El ajuste de datos experimentales se realizó utilizando el software Geogebra 2D Graphing, con el modelo de Langmuir mostrando un mejor ajuste (Fig. 7). En la literatura, se encuentran ejemplos de biosorbentes, como las algas marinas, cuyas isotermas se ajustan al modelo de Langmuir, tales como el caso del bioadsorbente *M. pyrifera* y el adsorbato Ni(II) [4].

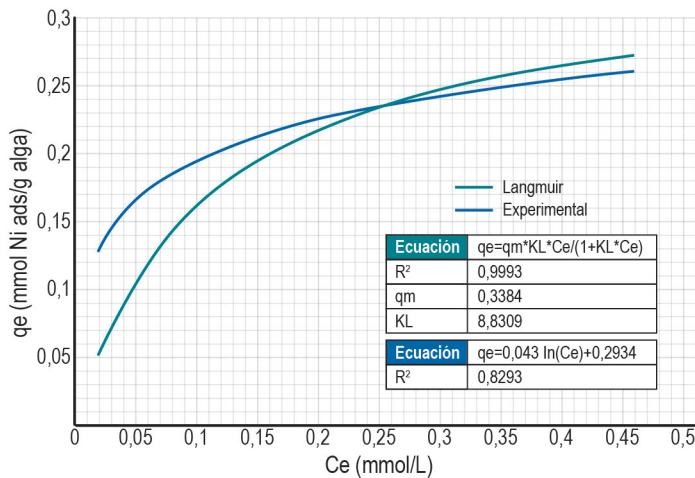


Figura 7: Curvas de equilibrio y ajustes realizados del sistema *Ulva Lactuca*-Ni (II).

ANALISIS

Los resultados obtenidos mediante TXRF para los ensayos de liberación de impurezas indican que los iones liberados solo están presentes a nivel de trazas, por lo que no afectan la viabilidad para emplear estos materiales como adsorbentes no convencionales en reactores para el tratamiento de efluentes que contienen metales. La diversidad de bandas que presentan los espectros FT-IR (Fig. 6) refleja un gran número de posibles sitios activos que podrían participar en el proceso de adsorción. Para el sistema estudiado se cree que los posibles compuestos responsables de la adsorción son sulfonatos, carbonilos, oxidrilos, aminas y amidas. En los espectros FT-IR se observa la presencia de halogenuros de alquilo ($C-Cl$, $C-Br$), y en el microanálisis superficial SEM-EDS se detecta bromo (Fig. 3 y 4). Los grupos sulfonatos presentes en el material dan lugar a dos picos en el espectro FT-IR y la presencia de azufre aparece en el microanálisis superficial SEM-EDS (Fig. 3 y 4). El intercambio iónico es un concepto importante en la biosorción de metales debido a que ciertos polisacáridos naturales poseen la propiedad de intercambiar iones metálicos bivalentes con los contraíones que ocupan sus sitios activos. Este mecanismo puede explicar el proceso de remoción de metales pesados, especialmente si se tiene en cuenta que el alginato juega un papel importante durante la remoción de metales [5]. Como se pudo observar en microanálisis superficial multipunto del sistema alga sin adsorbato, su pared celular contiene metales tales como aluminio, silicio, potasio, calcio, hierro y magnesio que podrían estar involucrados en el proceso de remoción de Ni (II).

Los resultados experimentales fueron mejor representados por el modelo Langmuir. La forma de la isoterma de adsorción puede ser caracterizada por una tendencia asintótica que parece ser

más consistente con la ecuación tipo Langmuir que con la ecuación de Freundlich. Se observa la típica meseta que indica la saturación de los sitios de unión del biosorbente.

El microanálisis superficial SEM-EDS confirmó la presencia de níquel en la superficie del bio-adsorbente (Fig. 4), con un porcentaje de remoción de Ni (II) del 90,6 % (Fig. 2).

CONCLUSIONES

Se cree que para el sistema estudiado existen posibles compuestos responsables de la adsorción como sulfonatos, carbonilos, oxidrilos, aminas y amidas presentes en la pared celular que podrían ser los responsables del proceso de adsorción, junto con el posible proceso de intercambio de iones metálicos bivalentes con los contraíones que ocupan sus sitios activos. Estos mecanismos podrían explicar el proceso de remoción de metales. Dado los buenos resultados de remoción, se continuará con los estudios, considerando que la *Ulva lactuca* podría utilizarse como material de relleno en reactores para el tratamiento no convencional de efluentes que contienen metales.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Santa Cruz (UTN- FRSC) y Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería (UBA-FI) (proyecto UBACyT: 20020190100323BA) por el financiamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1) Saralegui, A., Piol, M. N., Willson, V., Caracciolo, N., Ramos, S., & Boeykens, S. (2024). Biore-mediation for Sustainable Environmental Cleanup. CRC Press.
- 2) Boraso, A. L. (1997). Ulva en Puerto Deseado, Provincia de Santa Cruz. Darwiniana.
- 3) Foo, K. Y. and B. H. Hameed (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. Chemical Engineering Journal .156(1): 2- 10.
- 4) Plaza Cazón, J. (2012). Remoción de metales pesados empleando algas marinas. Universidad Nacional de La Plata.
- 5) Murphy, V., Hugues, H., McLoughlin, P. (2008). Comparative study of chromium biosorption by red, green and brown seaweed biomass. Chemosphere, 70(6), 1128-1134.

MODELO CINÉTICO PARA LA ACETILACIÓN HOMOGÉNEA DE GLICEROL CRUDO EMPLEANDO ÁCIDO ACÉTICO

Federico M. Perez^{1,2}, Francisco Pompeo^{1,2}, Gerardo F. Santori^{1,2} y Martín N. Gatti^{1,2*}

¹Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas Dr. Jorge J. Ronco (CINDECA, CONICET-CIC-UNLP).

²Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. *martin.gatti@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un modelo cinético basado en la ley de la potencia para describir la evolución de la conversión de glicerol y la distribución de productos en la reacción de acetilación de glicerol (G) crudo con ácido acético (AA) en ausencia de catalizador. Para ello, se realizaron pruebas experimentales con glicerol analítico bajo diferentes condiciones de reacción ($T=80-160^{\circ}\text{C}$, relación molar AA/G=6, $t=0,25-2\text{h}$). Estos resultados permitieron desarrollar un modelo cinético basado en la ley de la potencia, que logró estimar aceptablemente las concentraciones experimentales con un error relativo medio del 14,9%. Posteriormente, se caracterizaron muestras de glicerol crudo procedentes de diferentes industrias de biodiésel, identificando y cuantificando las impurezas presentes en ellas y se emplearon en los ensayos de reacción. Dadas las diferencias observadas en los valores de conversión, se realizaron pruebas de reacción añadiendo individualmente cada impureza, con el objetivo de determinar su efecto sobre los parámetros de reacción. A partir de estos resultados, se introdujeron factores de actividad que permitieron modificar el modelo cinético para estimar la conversión de glicerol en las muestras de glicerol crudo con un error relativo medio del 7,8%.

Palabras Clave: Biomasa, biorrefinerías, glicerol crudo, modelo cinético.

INTRODUCCIÓN

La expansión mundial de la industria del biodiésel ha provocado un aumento de la oferta de glicerol, un subproducto de su proceso de síntesis, el cual puede utilizarse como molécula plataforma para obtener valiosos productos químicos y energía. En particular, la acetilación con ácido acético ha cobrado relevancia en los últimos años, debido al especial interés por los productos obtenidos de la reacción (Perez, 2023). Esta reacción da lugar a la formación de mono-, di- y tri-ésteres de glicerol (Figura 1). Los monoacetilgliceroles (MAG) y los diacetilgliceroles (DAG) se utilizan para producir poliésteres biodegradables y aditivos alimentarios, entre otras aplicaciones (Liao, 2009). El triacetilglicerol (TAG) se utiliza en la producción de cosméticos, plastificantes, disolventes y puede ser empleado como aditivo para combustibles (Aya, 2024).

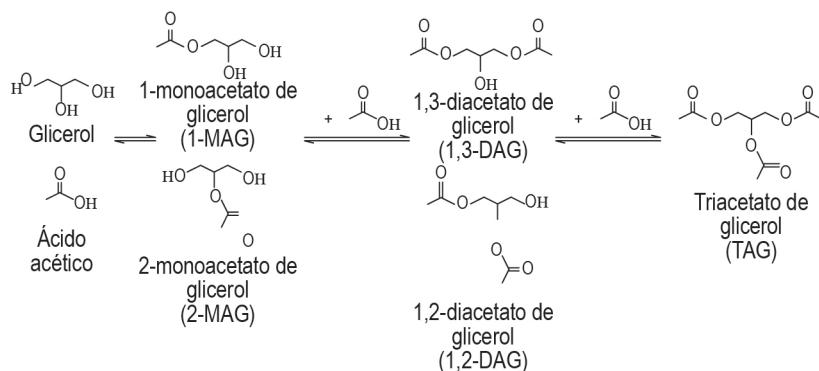


Figura 1. Esquema de la reacción de acetilación de glicerol con ácido acético.

La reacción de síntesis de biodiesel produce aproximadamente un 10 % en peso de glicerol como subproducto, denominado glicerol crudo, con un grado de pureza de entre el 55 y el 90 % en peso. Generalmente, las impurezas encontradas incluyen trazas de triglicéridos sin reaccionar y alcoholes de cadena corta, biodiesel, ácidos grasos, jabones y otros compuestos minoritarios (Balaraju 2010; Zhu, 2012; Gatti, 2023). El glicerol crudo puede refinarse aún más para su uso en diversas aplicaciones. No obstante, dado que los procesos necesarios para refinar el glicerol crudo pueden ser costosos, uno de los mayores retos en el concepto de biorrefinería es utilizar muestras de glicerol crudo tal y como proceden de la industria del biodiésel, sin tratar.

OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo cinético basado en la ley de la potencia para describir la evolución de la conversión de glicerol y la distribución de productos en la reacción de acetilación de glicerol crudo con ácido acético en ausencia de catalizador.

METODOLOGÍA

Los ensayos de reacción se llevaron a cabo en un reactor de 100 ml de acero inoxidable marca Berghof. En cada reacción, 1g de glicerol y 4g de ácido acético (relación molar AA/G=6) se cargaron en el reactor, el cual se presurizó a 2 MPa con N₂, se calentó a la temperatura deseada (80-160°C) y se agitó a 1000 rpm durante diferentes tiempos de reacción (15-120 min). En algunas pruebas de reacción se empleó glicerol analítico (99,99 %p/p), mientras que en otros casos se utilizaron muestras de glicerol crudo. La concentración de los productos de reacción se determinó mediante cromatografía de gases, empleando un equipo Shimadzu GCMS-QP505A equipado con una columna capilar PE-Elite-Wax y detector FID. La conversión total de glicerol (X) se determinó mediante la Ecuación 1, donde n⁰_G representa los moles iniciales de_G glicerol y n_G representa los moles finales de glicerol. La selectividad a cada producto líquido (S_i) se calculó mediante la Ecuación 2, donde n_i representa los moles finales del compuesto i.

$$X (\%) = \frac{n_G^0 - n_G}{n_G^0} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$S_i (\%) = \frac{n_i}{n_G^0 - n_G} \cdot 100\% \quad (2)$$

En la Figura 1 puede observarse que la formación de MAG se produce mediante la reacción entre el glicerol (G) y el ácido acético (AA). A continuación, la formación de DAG se produce a través de la reacción entre MAG y AA, y finalmente el TAG se forma a partir de DAG y AA. En todos los pasos se libera agua. Para describir la evolución de la conversión de glicerol y la distribución de los productos líquidos se implementó un modelo cinético tipo ley de la potencia para representar las velocidades de reacción de cada paso de reacción, considerando que todos ellos son elementales y reversibles (Ecuaciones 3-5).

$$r_1 = k_1 C_G C_{AA} - k_1' C_{MAG} C_{H2O} \quad (3)$$

$$r_2 = k_2 C_{MAG} C_{AA} - k_2' C_{DAG} C_{H2O} \quad (4)$$

$$r_3 = k_3 C_{DAG} C_{AA} - k_3' C_{TAG} C_{H2O} \quad (5)$$

La tasa de consumo de glicerol y ácido acético, así como las tasas de formación de cada producto líquido (MAG, DAG, TAG) se determinaron a partir de los perfiles de concentración obtenidos en los ensayos de actividad mediante el método diferencial. A continuación, se calcularon los coeficientes cinéticos (k_1 , k_1' , k_2 , k_2' , k_3 y k_3') mediante regresión lineal múltiple, estableciendo un nivel de confianza del 95%. Una vez determinados los parámetros cinéticos, las ecuaciones de equilibrio se integraron numéricamente utilizando el método de Euler. La energía de activación aparente (E_{aj}) y el factor pre-exponencial (k_{oj}) se obtuvieron linealizando la ecuación de Arrhenius.

Las impurezas contenidas en las muestras de glicerol crudo contribuyen a disminuir la tasa de reacción, por lo que su presencia ha sido cuantificada considerando un factor de actividad global que actúa como factor de desactivación de la actividad, presentado en la Ecuación 6. En esta ecuación, C_i es la concentración de la impureza i y t es el tiempo de reacción. Los parámetros k_i y K_i fueron obtenidos a partir de la correlación de datos experimentales obtenidos a partir del agregado individual de cada impureza a la mezcla inicial de reacción, variando su concentración. Una vez obtenido el valor del factor global de actividad, la velocidad de reacción del glicerol se modifica de acuerdo con la Ecuación 7.

$$a = [1 - \sum_{i=1}^n \frac{k_i C_i^n}{1 + k_i C_i^n}] e^{(-1 - \sum_{i=1}^n \frac{k_i C_i^n}{1 + k_i C_i^n}) t} \quad (6)$$

$$(-r_G) = a [k_1 C_G C_{AA} - k_1' C_{MAG} C_{H2O}] \quad (4)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las pruebas de reacción en función del tiempo de reacción a diferentes temperaturas permitieron determinar los coeficientes cinéticos de los tres pasos de reacción a 80 °C, 120 °C y 160 °C, utilizando regresión lineal múltiple con un nivel de confianza del 95%. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

T (°C)	k_1 (L mol ⁻¹ h ⁻¹)	k_1' (L mol ⁻¹ h ⁻¹)	k_1/k_1'	R ₂
80	0,0129 ± 0,0041	0,0010 ± 0,5870	12,90	0,88
120	0,1071 ± 0,0054	0,0141 ± 0,0391	7,59	0,99
160	1,4094 ± 0,1744	0,3380 ± 0,1654	4,17	0,99
T (°C)	k_2 (L mol ⁻¹ h ⁻¹)	k_2' (L mol ⁻¹ h ⁻¹)	k_2/k_2'	R ₂
80	0,0200 ± 0,0190	0,1001 ± 0,5831	0,1998	0,84
120	0,0394 ± 0,0131	0,1231 ± 0,1616	0,3201	0,89
160	0,1936 ± 0,0153	0,1961 ± 0,0412	0,9872	0,99
T (°C)	k_3 (L mol ⁻¹ h ⁻¹)	k_3' (L mol ⁻¹ h ⁻¹)	k_3/k_3'	R ₂
80	0,0034 ± 0,0004	0,8822 ± 0,2380	0,0038	0,99
120	0,0108 ± 0,0020	0,4052 ± 0,1314	0,0444	0,97
160	0,0310 ± 0,0019	0,1497 ± 0,0220	0,2078	0,99

Tabla 1. Coeficientes cinéticos a 80 °C, 120 °C y 160 °C, obtenidos por regresión lineal múltiple. Nivel de confianza: 95%.

Como puede observarse, los resultados muestran una buena concordancia con el modelo lineal, ya que los coeficientes de correlación múltiple están entre 0,84 y 0,99. Además, estos parámetros lograron predecir los resultados experimentales de actividad con un error relativo medio del 14,9%. Una vez establecidos los coeficientes cinéticos a 80 °C, 120 °C y 160 °C, los factores pre-exponenciales y las energías de activación aparentes fueron calculados a partir de la ley de Arrhenius (Tabla 2).

Etapa de reacción	k_{oj} (L mol ⁻¹ h ⁻¹)	E_{aj} (kJ mol ⁻¹)	R ₂
1	9,86 10 ⁸ ± 14,3	73,92 ± 8,62	0,99
2	2,95 10 ³ ± 25	35,43 ± 10,43	0,92
3	4,73 10 ² ± 1,49	34,74 ± 1,30	0,99

Tabla 2. Energía de activación aparente (E_{aj}) y logaritmo natural del factor pre-exponencial (k_{oj}) obtenidos a partir de la linealización de la ecuación de Arrhenius.

Los valores de energía de activación obtenidos son similares para el segundo y el tercer paso, pero el valor del factor pre-exponencial es mayor para el segundo paso, lo que indicaría que la frecuencia con la que las moléculas de MAG y AA colisionan efectivamente para formar DAG y agua es mayor que la frecuencia con la que las moléculas de DAG y AA colisionan para formar TAG y agua. El resultado global es que se favorece la formación de DAG frente a la de TAG, tal y como se observa en los resultados experimentales.

Estudios previos acerca de la composición de las muestras de glicerol crudo permitieron cuantificar las impurezas derivadas del proceso de producción de biodiesel, que incluyen NaOH, MeOH, agua, materia orgánica no glicerina (MONG), NaCl, NaCOOH y acetato de sodio (Gatti, 2023). A partir de estas concentraciones, se determinaron los factores globales de actividad que modificarán la velocidad de reacción del glicerol analítico (Tabla 3).

Muestra de glicerol crudo	Factor de actividad global
A	$0,88 e^{-0,88 t}$
B	$0,54 e^{-0,54 t}$
C	$0,52 e^{-0,52 t}$
D	$0,93 e^{-0,93 t}$
E	$0,71 e^{-0,71 t}$

Tabla 3. Factores de actividad global para los diferentes crudos.

Basándose en el factor de actividad global, la tasa de consumo de glicerol se expresó según la Ecuación 7, y se empleó el método de Euler para obtener los valores de conversión. La Figura 2 muestra los valores de conversión para las muestras de glicerol crudo A-E obtenidos experimentalmente y los perfiles de conversión predichos utilizando el modelo cinético modificado, considerando los factores de actividad global. Como puede observarse, existe un ajuste aceptable, indicando que el modelo permite estimar las conversiones experimentales de las muestras de glicerol crudo con un error medio del 7%.

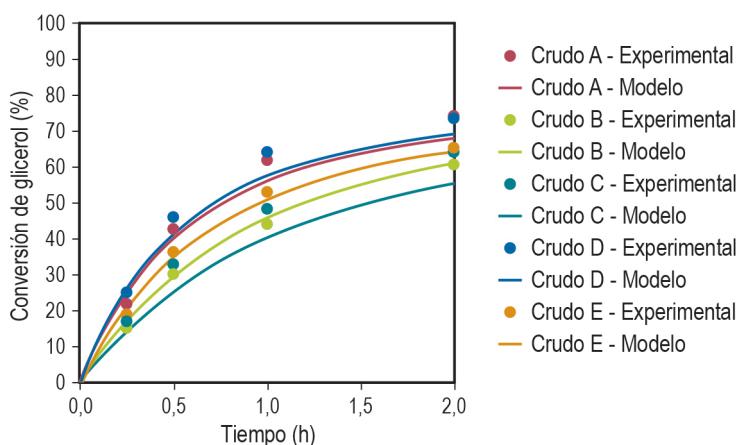


Figura 2. Conversión de glicerol en función del tiempo para las muestras de glicerol crudo A, B, C, D y E. Condiciones de reacción: 120 °C, AA/G = 6, P = 2 MPa de N2.

CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un modelo cinético basado en la ley de potencia para describir la evolución de la conversión de glicerol y la distribución de productos en la reacción de acetilación de glicerol sin emplear catalizador, considerando muestras de glicerol analítico y glicerol

crudo. Basándose en los resultados, se propuso un modelo cinético de ley de potencia que ajustó satisfactoriamente los resultados experimentales con un error relativo medio del 14,9%. Las pruebas de reacción empleando muestras de glicerol crudo mostraron una disminución en la conversión de glicerol para todos los casos, pero sin cambios significativos en la selectividad a MAG, DAG y TAG. El cálculo de factores de actividad individuales para cada impureza permitió modificar el modelo cinético, estimando las conversiones de glicerol crudo con un error relativo medio del 7%.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aya S., Taha A., Roberto N., María P-P., Vincenzo S., Jesús E. (2024). Production of triacetin from industrially derived purified glycerol: Experimental proof of concept, kinetic model derivation and validation. *Chem. Eng. Journal* 15, 153905. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153905>.
- Balaraju M.; Rekha V.; Prabhavathi Devi B. L. A.; Prasad R. B. N.; Sai Prasad P. S.; Lingaiah N. (2010). Surface and structural properties of titania-supported Ru catalysts for hydrogenolysis of glycerol. *Appl. Catal. A: Gen.* 384, 107-114. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2010.06.013>.
- Zhu S.; Zhu Y.; Hao S.; Zheng H.; Mo T.; Li Y. (2012). One-step hydrogenolysis of glycerol to bio-propanols over Pt-H4SiW12O40/ZrO₂ catalysts. *Green Chem.* 14, 2607-2616. <https://doi.org/10.1039/C2GC35564G>.
- Gatti M.N.; Pompeo F; Nichio N.N.; Santori G.F. (2023). Crude Glycerol Hydrogenolysis to Bio-Propylene Glycol: Effect of Its Impurities on Activity, Selectivity and Stability. *Processes* 11, 1731. <https://doi.org/10.3390/pr11061731>.
- Liao, X.; Zhu, Y.; Wang, S.G.; Chen, H.; Li, Y. (2009). Theoretical Elucidation of Acetylation of Glycerol with Acetic Acid and Acetic Anhydride. *Appl. Catal. B Environ.* 94, 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2009.10.021>.
- Perez, F.M.; Gatti M.N.; Santori, G.F.; Pompeo, F. (2023). Transformations of Glycerol into High-Value-Added Chemical Products: Ketalization and Esterification Reactions. *Reactions* 4, 569–634. <https://doi.org/10.3390/reactions4040034>.

ESTUDIO DEL ESTADO TRÓFICO DE LOS ARROYOS SARANDÍ Y SANTO DOMINGO

Tatiana D. Lazo¹, Laura B. Melitón², Cristina T. Spelitni³, Gabriela F. Coppo⁴ y
Jorge G. Machalec⁵

^{1,2,3,4,5} Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional Avellaneda, lazo.tatianad@gmail.com

RESUMEN

Las cuencas de los arroyos Sarandí y Santo Domingo se localizan en el Partido de Avellaneda, al sur del Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA). Estas cuencas están fuertemente influenciadas por el crecimiento urbano e industrial de la zona, lo que ha generado una modificación significativa de su paisaje natural. Ambos arroyos presentan tramos entubados y tramos a cielo abierto, donde el impacto de las actividades humanas es más evidente. Desde el año 2010 se han realizado investigaciones que han permitido identificar los cambios ocurridos en las cuencas, proporcionando datos valiosos para el desarrollo de estrategias para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) en línea con la meta 5 del Objetivo de Desarrollo Sostenible número 6 (ODS 6.5) de la Agenda 2030.

Este estudio tiene como objetivo actualizar el estado de la calidad del agua en los tramos a cielo abierto de ambos arroyos aplicando Índices de Estado Trófico (IET) sobre la base de macronutrientes como el fósforo y el nitrógeno.

Los resultados de los distintos IET indican que el arroyo Sarandí y el arroyo Santo Domingo presentan estados eutróficos predominantes, ambos con concentraciones de nutrientes elevadas lo cual conduce al proceso de eutrofia de los mismos.

Palabras Clave: Arroyos, eutrofización, calidad, macronutrientes, IET.

INTRODUCCIÓN

Las cuencas de los arroyos Sarandí y Santo Domingo se localizan en el Partido de Avellaneda, en la provincia Buenos Aires. La cuenca abarca un área aproximada de 240 km², se encuentra ubicada en los partidos de Avellaneda, Quilmes, Lanús, Lomas de Zamora, Almirante Brown, Florencio Varela y Presidente Perón. Estos partidos forman parte de la Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) la cual concentra el 37% de la población total del país en un espacio menor al 1% del territorio nacional [1]. Estas cuencas están fuertemente influenciadas por el crecimiento urbano e industrial de la zona, lo que ha generado una modificación significativa de su paisaje natural. Ambos arroyos tienen como cuerpo receptor al Río de la Plata y presentan tramos entubados y tramos a cielo abierto en donde el impacto de las actividades humanas es más evidente.

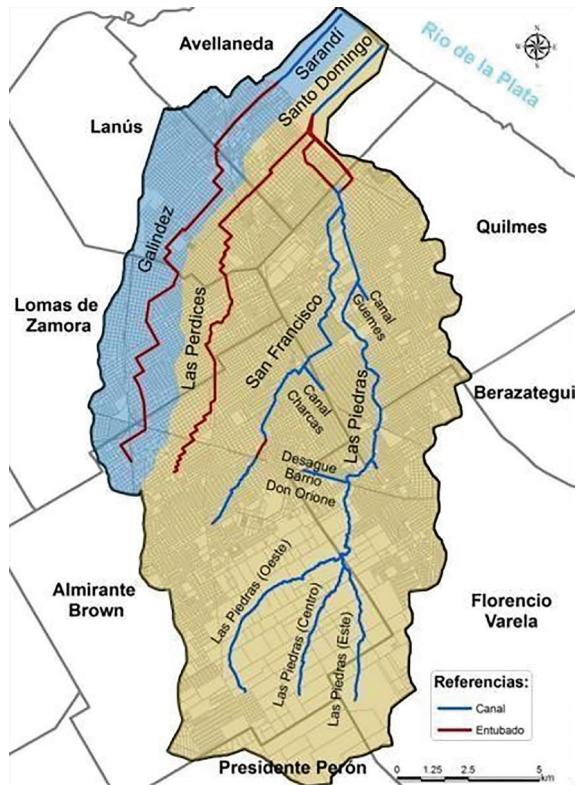


Figura 1: Cuenca Arroyo Sarandí- Santo Domingo y arroyos principales. Fuente: INA

Uno de los principales procesos que afecta negativamente el equilibrio ecológico y la calidad del recurso hídrico es la eutrofización. Este fenómeno implica un aumento significativo de macro-nutrientes, principalmente nitrógeno (N) y fósforo (P). Esta carga adicional de nutrientes tiene origen antropogénico y se basa en que el exceso de nutrientes promueve un crecimiento desmedido de plantas y otros organismos [2]. Asimismo, incrementa, entre otros, el riesgo de floraciones de algas productoras de toxinas, como son las cianobacterias cuya presencia se ha evidenciado en los últimos años en el cuerpo hídrico receptor de los arroyos en estudio [3]. La clasificación de los estados tróficos se muestra en la tabla 1.

Oligotrófico	Pobre en nutrientes, presenta aguas claras y oxígeno abundante. La productividad biológica es baja, suelen ser profundos y con poca vegetación
Mesotrófico	Posee un nivel intermedio de nutrientes. Presentan una moderada cantidad de vegetación acuática con calidad del agua relativamente buena.
Eutrófico	Poseen alta concentración de nutrientes lo que favorece el crecimiento excesivo de plantas y algas.
Hipereutrófico	El estado trófico con exceso de nutrientes se denomina y se caracteriza por presentar un crecimiento explosivo de algas y plantas, esto deteriora significativamente la calidad del agua.

Tabla 1: Estados tróficos de los cuerpos de agua y sus características [4].

Existen distintos Índices de Estado Trófico (IET) que permiten valorar la eutrofización de un cuerpo de agua según la variable a evaluar. Para este estudio se utilizaron tres IET propuestos por Carlson, Toledo y por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) para analizar la evolución del estado ambiental de los arroyos en sus tramos a cielo abierto.

OBJETIVOS

Este estudio tiene como objetivo actualizar el estado de la calidad del agua de los tramos a cielo abierto de ambos arroyos, dada la implicancia que tienen sobre el cuerpo receptor, aplicando Índices de Estado Trófico (IET) sobre la base conceptual de eutrofización de los macronutrientes asociados, principalmente Nitrógeno (N) y fósforo (P) de la cuenca.

METODOLOGÍA

Para la evaluación del estado trófico de estos cuerpos hídricos se realizaron dos campañas de muestreo de los arroyos en sus tramos a cielo abierto durante el año 2023, en cada campaña se muestrearon tres sitios del arroyo.

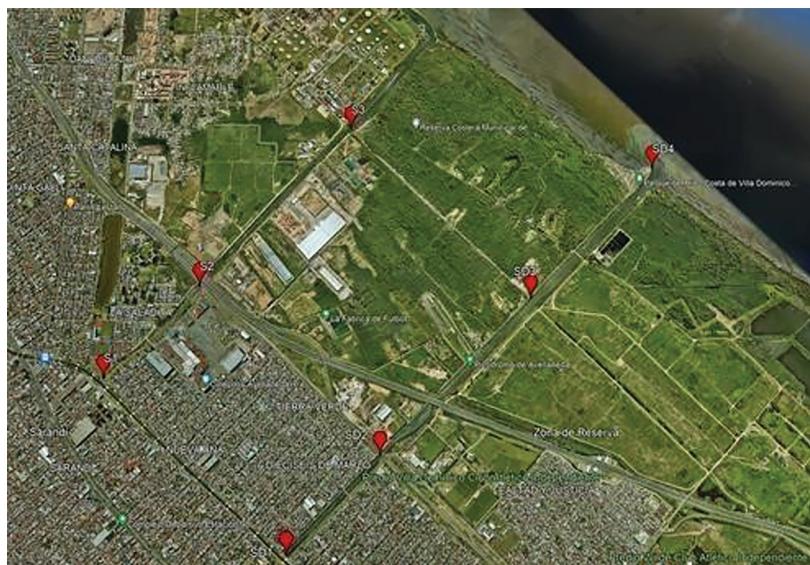


Figura 2: Ubicación de los puntos de muestreo de los arroyos Sarandí y Santo Domingo

Las campañas de muestreo se realizaron, al igual que en las campañas anteriores, en condiciones de bajante del Río de la Plata y a 0, 2 m de profundidad. Las determinaciones analíticas sobre las muestras de agua fueron efectuadas en el laboratorio de Ensayos Especiales (LEE) de la Universidad Tecnológica Nacional de la Facultad Regional Avellaneda (UTNFRA), Departamento de Ingeniería Química, según Métodos Estandarizados [5]. Entre los parámetros analizados se cuantificaron fósforo total (Pt), nitrógeno total (Nt).

La evaluación del estado trófico de los arroyos se realizó aplicando tres índices: IETC, IETM, OCDE y relaciones de nitrógeno y fosforo para establecer el nutriente limitante según se detalla a continuación.

Índice de estado trófico de Carlson

$$IETC (PT) = 10 * [6 - (\frac{\ln \frac{48}{PT}}{\ln 2})] \quad (1)$$

IETC (PT) es el índice de estado trófico de Carlson para el fósforo total y $\ln PT$ el logaritmo natural de la concentración de fósforo total (mg/l). [6]

Índice de estado trófico modificado por Toledo

$$IETM (PT) = 10 * [6 - (\frac{\ln \frac{80.32}{PT}}{\ln 2})] \quad (2)$$

El IETM (PT) es el índice de estado trófico de Carlson modificado por Toledo para el fósforo total y $\ln PT$ el logaritmo natural de la concentración de fósforo total (mg/l). [6]

Los valores adimensionales obtenidos al aplicar la ecuación 1 y la ecuación 2 varían en una escala de 0 a 100 y el criterio de categorización fue: ultraoligotrófico <30, oligotrófico entre 30 y 44, mesotrófico entre 44 y 54, eutrófico entre 54 y 74 e hipereutrófico >74.

Índice de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico

El índice de la OCDE proporciona un esquema cuantitativo probabilístico para las diferentes categorías de estado trófico a partir del análisis de nutrientes. Se estimó el estado de los arroyos usando los niveles de fósforo Total (PT), de acuerdo con los criterios establecidos por este índice lo cuales son presentados en la Tabla 2. [7]

Categoría trófica	Fósforo total ($\mu\text{g/l}$)
Ultraoligotrófico	<4
Oligotrófico	4 a 10
Mesotrófico	10 a 35
Eutrófico	35 a 100
Hipereutrófico	>100

Tabla 2: Valores límites de la OCDE para un sistema de clasificación trófica.

Determinación de Nutriente Limitante

Para analizar cuál resulta ser el nutriente limitante de la producción biológica en los arroyos se utilizó la relación Nitrógeno-Fósforo aplicando los siguientes criterios:

- 1) Si la relación excede de 10, entonces P es el factor nutricional limitante.
- 2) Cuando varía entre 5 y 10, cualquiera de los dos (N o P) podría serlo en un momento dado.
- 3) Si la relación está por debajo de 5, el nutriente limitante es N.

RESULTADOS

Las Tablas 3 y 4 muestran los valores obtenidos en ambas campañas:

Parámetro	Campaña 1: 06/07/23			Campaña 2: 14/09/23		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
Pt (mg/l)	413	1,8	200	49,6	60,7	570
Nt (mg/l)	1,156	0,542	0,902	2,299	0,558	1,560

Tabla 3: Arroyo Sarandí

Parámetro	Campaña 1: 06/07/23				Campaña 2: 14/09/23			
	SD1	SD2	SD3	SD4	SD1	SD2	SD3	SD4
Pt (mg/l)	4,2	5,8	3,1	4	87,5	64,7	96,2	144
Nt (mg/l)	1,097	2,150	1,268	3,815	7,133	6,538	6,221	6,132

Tabla 4: Arroyo Santo Domingo**Índice de estado trófico de Carlson**

Índice	Campaña 1: 06/07/23			Campaña 2: 14/09/23		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
IETC	59,86	28,97	59,72	58,87	59,08	59,90

Tabla 5: Resultados de Arroyo Sarandí

Índice	Campaña 1: 06/07/23				Campaña 2: 14/09/23			
	SD1	SD2	SD3	SD4	SD1	SD2	SD3	SD4
IETC	46,70	50,37	41,98	46,04	59,36	59,14	59,42	59,61

Tabla 6: Resultados de Arroyo Santo Domingo

Los valores del IETC oscilaron entre 28,97 y 59,9 para el arroyo Sarandí (Tabla 5), indicando predominantemente el estado eutrófico del cuerpo de agua en todos los sitios de muestreo; mientras que para el arroyo Santo Domingo se obtuvieron valores de IETC entre 41,98 y 59,61 (Tabla 6), indicando un estado Mesotrófico para la primera campaña en época invernal y un estado Eutrófico en la segunda campaña en primavera.

Índice de estado trófico modificado por Toledo

Índice	Campaña 1: 06/07/23			Campaña 2: 14/09/23		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
IETM	59,85	24,85	59,68	58,72	58,96	59,89

Tabla 7: Resultados de Arroyo Sarandí

Índice	Campaña 1: 06/07/23				Campaña 2: 14/09/23			
	SD1	SD2	SD3	SD4	SD1	SD2	SD3	SD4
IETM	44,93	49,09	39,59	44,18	59,28	59,02	59,34	59,56

Tabla 8: Resultados de Arroyo Santo Domingo

Los valores del IETM oscilaron entre 24,85 y 59,89 para el arroyo Sarandí (Tabla 7), indicando el estado Eutrófico del cuerpo de agua; mientras que para el arroyo Santo Domingo se obtuvieron valores de IETM entre 39,59 y 59,56 (Tabla 8), indicando un estado Mesotrófico para la primera campaña en época invernal y un estado Eutrófico en la segunda campaña en primavera.

Índice de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico

Índice	Campaña 1: 06/07/23			Campaña 2: 14/09/23		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
Pt (LEE)	413	1,8	200	49,6	60,7	570
OCDE	>100	<4	>100	35 a 100	35 a 100	>100

Tabla 9: Comparación de valores entre resultados de LEE y valores de OCDE - Arroyo Sarandí

Índice	Campaña 1: 06/07/23				Campaña 2: 14/09/23			
	SD1	SD2	SD3	SD4	SD1	SD2	SD3	SD4
Pt (LEE)	4,2	5,8	3,1	4	87,5	64,7	96,2	144
OCDE	4 a 10	4 a 10	<4	4 a 10	35 a 100	35 a 100	35 a 100	>100

Tabla 10: Comparación de valores entre resultados de LEE y valores de OCDE- Arroyo Santo Domingo

Según los criterios de categorización del índice de estado trófico de la OCDE se estima que el estado del arroyo Sarandí es Hipereutrófico (Tabla 9) y el arroyo Santo Domingo es oligotrófico en primera campaña y eutrófico para la segunda campaña (Tabla 10).

Determinación de Nutriente Limitante

La relación N/P en el agua superficial del arroyo Sarandí se encontró entre 0,003 y 0,301. Por otro lado, la relación N/P en el agua superficial del arroyo Santo Domingo se encontró entre 0,043 y 0,954. Con base en estos resultados el nutriente limitante de la producción biológica en ambos arroyos fue el nitrógeno.

CONCLUSIONES

El estado trófico es una característica importante de los ecosistemas acuáticos ya que refleja la influencia antrópica sobre la calidad del agua y el funcionamiento ecológico de los cuerpos de agua. Esta condición está definida por el grado de eutrofización. En función de los cálculos realizados de los distintos Índices de Estado Trófico se puede concluir que tanto el arroyo Sarandí como el Santo Domingo poseen un estado eutrófico predominante. Los índices IETC e IETM arrojaron resultados 100% coincidentes y se observó un 80% de coincidencia entre IETC, IETM y OCDE. Si bien el elemento limitante es el nitrógeno, las concentraciones generales de los nutrientes son elevadas, contribuyendo al proceso de eutrofia que se desarrolla en los cuerpos de agua estudiados. Estos hallazgos sirven de base para el entendimiento ecológico del ecosistema y la formulación de planes de manejo integral de los recursos hídricos involucrados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbott, M., Bathurst, J., Cunge, J., Connell, O., Rasmussen, P., & Hydrol, J. J. (1986). An introduction to the European Hydrological System. Système Hydrologique Européen "SHE". J. J. Hydrol.
- Apha, A. . (2005). Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 21th Edition.
- Autoridad del Agua. (2021). Sistema de Alerta Temprana para la detección de Floraciones Algales. Fonte: <https://ada.gba.gov.ar/sistema-dealertatemprana-para-la-deteccion-de-floraciones-algales/>
- Lecertua, E. A. (s/f). Modelación hidrológica - hidráulica de la cuenca Sarandí - Santo Domingo ante un evento de precipitación extrema.
- Marín-Leal, J. C.-F.-O. (2023). Estado trófico y nutriente limitante de la producción biológica en una laguna tropical somera. . Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas, 2(2), e502.
- OECD - Organization for Economic Cooperation and Development. (2003).
- Environmental Indicators-Development, Measurement and Use. . Fonte: <https://www.oecd.org/env/indicators-modellingoutlooks/24993546.pdf>
- Vásquez Zapata1*, G. L. (s/f). Methodology for Determining Eutrophication Levels In Aquatic Ecosystems.

OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS Y SIMULATED ANNEALING

Jorge O. Pellegrini y Jorge P. de Celis

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Avellaneda, Av. Ramón Franco 5500, Villa Dominico, Pcia. de Buenos Aires, Argentina. jpellegrini@fra.utn.edu.ar

RESUMEN

La contaminación por efluentes industriales es un problema significativo que impacta la salud humana y el medio ambiente. La adsorción se presenta como una técnica eficaz y económica para la remoción de contaminantes. Este trabajo propone optimizar isoterma de adsorción mediante Algoritmos Genéticos y Simulated Annealing. Se utilizaron 0.1 g de carbón activado en 100 ml de soluciones de cromo hexavalente, alcanzando el equilibrio en 48 horas, evaluando la capacidad de adsorción en función de las concentraciones inicial y de equilibrio. Se empleó la isoterma de Langmuir para modelar el equilibrio de adsorción. La función objetivo fue el error cuadrático medio entre los datos reales y los predichos. El Algoritmo Genético se implementó con una población de 100 individuos durante 10,000 generaciones, evaluando varios parámetros de optimización. Asimismo, se utilizó el método de Simulated Annealing, variando aleatoriamente los parámetros y aceptando nuevas soluciones según un criterio de aceptación. Los resultados mostraron que ambos métodos lograron valores para la función objetivo similares, lo que sugiere que la optimización heurística es efectiva.

Palabras Clave: Adsorción, optimización heurística.

INTRODUCCIÓN

La contaminación derivada de los efluentes industriales representa una preocupación significativa, ya que impacta negativamente tanto en la salud humana como en la fauna y flora del entorno (Quanz et al., 2021). En este contexto, la adsorción se presenta como una técnica prometedora debido a su simplicidad, eficacia y bajo costo (Pongener et al., 2018).

Un aspecto relevante en el estudio de la adsorción es la obtención de isotermas de adsorción, que proporcionan información valiosa sobre la capacidad de remoción de contaminantes y los parámetros termodinámicos involucrados en el proceso. No obstante, la aplicación de las isotermas en el diseño de filtros de adsorción frecuentemente es subestimada. Para el desarrollo de modelos matemáticos que describan de manera dinámica el comportamiento de un filtro de adsorción, es esencial integrar de forma adecuada las isotermas obtenidas experimentalmente (Červeňanský et al., 2019).

La estrategia de optimización que se propone tiene como objetivo formular un enfoque que permita al modelo generalizar el comportamiento de las isotermas. Dado que el problema es no lineal y de alta dimensión, se ha optado por implementar un enfoque de optimización heurística (Bierlaire et al., 2010).

OBJETIVOS

El objetivo del trabajo es aplicar el método de Algoritmos Genéticos y Simulated Annealing para la optimización de las isotermas de adsorción.

METODOLOGÍA

Para los experimentos de adsorción, se utilizó 0.1 g de carbón activado en 100 ml de solución. Se prepararon diversas soluciones con diferentes concentraciones de cromo hexavalente mediante la disolución de dicromato de potasio. Tras 48 horas, tiempo suficiente para alcanzar el equilibrio, se realizó la filtración. La capacidad de adsorción se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$q_e(C_e) = \frac{C_i - C_e}{m} \cdot V$$

Donde C_i [PPM] y C_e [PPM] representan la concentración inicial y de equilibrio de cromo hexavalente, m[g] es la masa de carbón activado, V[l] es el volumen de la solución y q_e [mg.g⁻¹] es la capacidad de adsorción.

La isoterma de Langmuir, ampliamente utilizada, representa adecuadamente el equilibrio de adsorción en sistemas similares al estudio (Rahim & Garba, 2016). La expresión es (Langmuir, 1918):

$$q_e(C_e) = \frac{q_m \cdot b \cdot C_e}{1 + b \cdot C_e}$$

Donde q_m [mg.g⁻¹] es la máxima capacidad de monocapa, b [L.mg⁻¹] es la constante de equilibrio. Para establecer una funcionalidad con los parámetros del modelo, se presenta la ecuación de van't Hoff y se propone una funcionalidad exponencial:

$$\ln(K_{eq}) = -\frac{\Delta H^0}{R \cdot T} + \frac{\Delta S^0}{R}$$

$$b(T) \cdot M_a = e^{-\frac{\Delta H^0}{R \cdot T} + \frac{\Delta S^0}{R}}$$
$$q_m(T) = A \cdot e^{C \cdot T}$$

Donde ΔH^0 [Kj.mol⁻¹] es la entalpía de adsorción, ΔS^0 [Kj.mol⁻¹.K⁻¹] es la entropía del proceso, R[Kj.mol⁻¹.K⁻¹] es la constante universal de los gases, T[K] es la temperatura absoluta, M_a [mg.mol⁻¹] es la masa molar del analito, A y C son constantes de ajuste.

La función objetivo es el error cuadrático medio entre los datos reales (y) y los predichos por los modelos.

$$\text{Función Objetivo} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (y_{ij} - (\frac{q_{mi} \cdot b_i \cdot C_{ej}}{1 + b_i \cdot C_{ej}}))^2$$

Donde m son los datos de cada n isotermas.

Los Algoritmos Genéticos son un método de optimización heurística inspirado en los principios de la selección natural y la genética, introducido por John Holland en 1975 (Holland, 1975). El procedimiento consiste en un conjunto de soluciones posibles W_i , donde cada solución se denomina individuo dentro de un conjunto conocido como población. Se realizan una serie de procedimientos para actualizar los valores de los individuos, y cada iteración se denomina generación. La expresión para las soluciones posibles es:

$$W_i = \{\Delta S^0, \Delta H^0, A, C\}$$

El método incluye los siguientes componentes: una población de individuos, selección basada en un criterio de adecuación (función objetivo), implementación de cruce para generar una nueva generación, y mutación aleatoria en la nueva generación. Además, se introduce el concepto de elitismo para acelerar la convergencia.

Los pasos del algoritmo son los siguientes:

- Inicialización aleatoria de la primera generación.
- Evaluación de la función objetivo.
- Realización del cruce con una probabilidad determinada.
- Realización de mutaciones con una probabilidad determinada.
- Ejecución de un torneo en una proporción definida de la población.
- Implementación del elitismo en una proporción definida de la población.
- Reemplazo de la generación actual por la modificada.
- Repetición del paso 2; cada iteración representa una generación diferente.

Para el segundo método de optimización, se utiliza Simulated Annealing. Este enfoque consiste en realizar una serie de iteraciones, variando aleatoriamente los parámetros a optimizar (Ledesma et al., 2008). En cada iteración, se evalúa la función objetivo aceptando las nuevas soluciones generadas tras la perturbación de los parámetros que disminuyen la función objetivo. Además, se incluye la posibilidad de aceptar una solución inferior, con una probabilidad decreciente a medida que avanzan las iteraciones, siguiendo una regla lineal. Las variables para optimizar son:

$$W_i = \{A, E_a, q_{m1}, q_{m2}, q_{m3}, q_{m4}, q_{m5}\}$$

Donde q_{mn} es la capacidad de adsorción máxima de monocapa para las distintas n temperaturas ensayadas.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Figura 1 se muestra el resultado de los experimentos de adsorción.

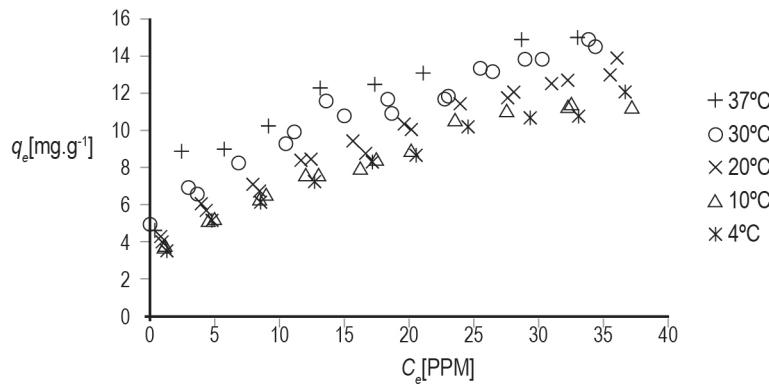


Figura 1: Isotermas de adsorción experimentales.

En cuanto al Algoritmo Genético, los parámetros del modelo se detallan en la Tabla 1.

Tamaño de la población	100
generaciones	10000
Tasa de crossover	80
Tasa de mutación	5
Tasa de torneo	15
Tasa de elitismo	5

Tabla 1: Parámetros de algoritmo genético.

Se muestra la evolución de la función objetivo en la Figura 2.

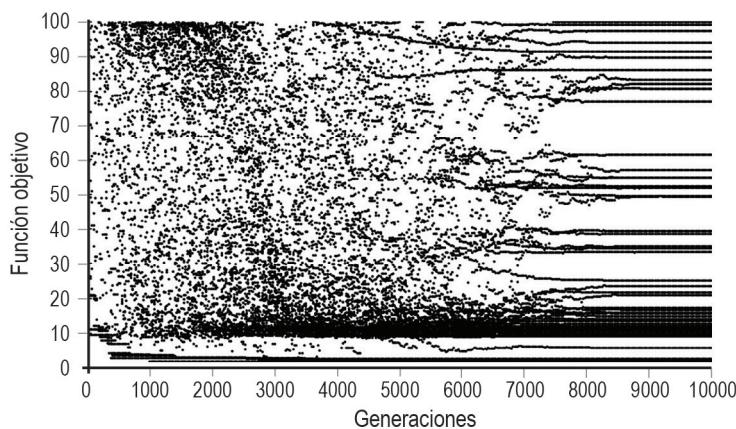


Figura 2: Evolución de la Función Objetivo en el empleo del Algoritmo Genético.

Se observa que el algoritmo genera una amplia gama de valores que converge hacia intervalos estrechamente restringidos a medida que aumentan las generaciones. Además, para la función objetivo se identifica la presencia un mínimo local alrededor de 10, lo que provoca la acumulación de valores en esa región. La variabilidad por debajo de este mínimo se atribuye tanto a la mutación como al cruce. La persistencia de una alta dispersión indica, por un lado, la existencia de mínimos locales y, por otro, la elevada sensibilidad de la función objetivo a variaciones en los parámetros W .

Respecto al método de Simulated Annealing, la evolución del error cuadrático medio en función de las iteraciones se presenta en la Figura 3.

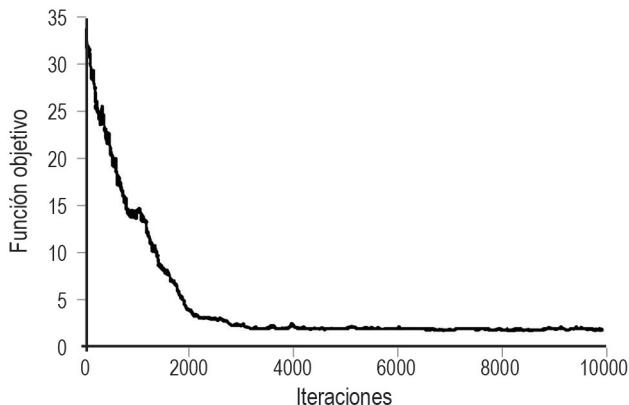


Figura 3: Evolución de la Función Objetivo en el empleo de Simulated Annealing.

Se puede observar la existencia de mínimos locales cuando la función se perturba en torno a un valor determinado, para luego incrementarse y posteriormente disminuir hacia un nuevo mínimo.

Los errores cuadráticos medios de las metodologías son similares, como se presenta en la Tabla 2, lo que sugiere que el uso de la optimización heurística es satisfactorio.

	Método Tradicional	Algoritmo Genético	Simulated Annealing
Función Objetivo	1,52	1,48	1,50

Tabla 2: Función Objetivo para cada metodología.

CONCLUSIONES

Se logró un resultado favorable a través de las metodologías propuestas, permitiendo el desarrollo de un modelo con mejores capacidades de generalización y contribuyendo a una modelización más precisa en el ámbito de la adsorción. Es fundamental enfatizar que esta propuesta no debe considerarse un reemplazo de la metodología tradicional, sino como una herramienta adicional; su utilidad dependerá de las necesidades específicas de cada aplicación. La consistencia en los resultados obtenidos en relación con las constantes sugiere robustez en ambas metodologías.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bierlaire, M., Thémans, M., & Zufferey, N. (2010). A heuristic for nonlinear global optimization. *INFORMS Journal on Computing*, 22(1), 59-70.
- Červeňanský, I., Mihal' M., & Markoš, J. (2019). Modeling of 2phenylethanol adsorption onto polymeric resin from aqueous solution: Intraparticle diffusion evaluation and dynamic fixed bed adsorption. *Chemical Engineering Research and Design*, 147, 292-304.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems* (John H. Holland) (Vol. 8). University of Michigan Press.
- Langmuir, I. (1918). THE ADSORPTION OF GASES ON PLANE SURFACES OF GLASS, MICA AND PLATINUM. *Journal of the American Chemical Society*, 40(9), 1361–1403.
- Ledesma, S., Avina, G., Sanchez, R. (2008). Practical considerations for simulated annealing implementation. *Simulated Annealing*, 20, 401e20.
- Pongener, C., Bhomick, P. C., Supong, A., Baruah, M., Sinha, U. B., & Sinha, D. (2018). Adsorption of fluoride onto activated carbon synthesized from Manihot esculenta biomass—Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 2382–2389.
- Quanz, M. E., Walker, T. R., Oakes, K., & Willis, R. (2021). Effects of industrial effluent on wetland macroinvertebrate community structures near a wastewater treatment facility. *Ecological Indicators*, 127, 107709.
- Rahim, A. A., & Garba, Z. N. (2016). Efficient adsorption of 4-Chloroguaiacol from aqueous solution using optimal activated carbon: Equilibrium isotherms and kinetics modeling. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 21(1), 17-23.

Avances Académicos

APANTALLAMIENTO MAGNÉTICO

Federico Hernan Saffioti^{*1}, Rodrigo Vilte¹

¹Universidad Tecnológica Nacional, Regional Avellaneda, Av. Mitre 750 (C1870ART) Avellaneda, Buenos Aires, Argentina.

**Autor a quien la correspondencia debe ser dirigida: fhsaffioti@hotmail.com*

RESUMEN

En este trabajo se abordó el problema de la exposición a campos magnéticos de baja frecuencia en oficinas cercanas a una línea de alta tensión de 132 kV, con el objetivo de verificar el cumplimiento de la normativa argentina (límite de 25 μT) y proponer una solución. La metodología fue el cálculo de la inducción magnética mediante la Ley de Ampere y el software FEMM (Método de Elementos Finitos). Los resultados mostraron una inducción magnética superior a la norma llegando a máximos de 33,8 μT sobre los puntos seleccionados, validando la necesidad de intervención.

Para reducir la inducción magnética dentro de las oficinas se evaluaron tres configuraciones de apantallamiento con chapas de aluminio. Las simulaciones realizadas en FEMM confirmaron la eficacia de las pantallas, y la solución de apantallamiento tipo C (chapas de aluminio aleación 1100 de 0,5 mm de espesor en la pared más cercana a la línea) se seleccionó por su efectividad y menor costo en comparación con las otras dos opciones, llegando a reducir el máximo a 14,4 μT .

Palabras clave: FEMM, Ley de Ampere, Campo magnético, Apantallamiento, método de elementos finitos.

ABSTRACT

This paper addresses the problem of low-frequency magnetic field exposure in offices located near a 132 kV high-voltage power line. The main objective was to verify compliance with Argentine regulations (a limit of 25 μT) and propose an effective solution. The methodology involved calculating magnetic induction using Ampere's Law and the FEMM (Finite Element Method Magnetics) software. The results showed a magnetic induction higher than the standard, reaching a maximum of 33.8 μT at selected points, which validated the need for intervention.

To reduce the magnetic induction inside the offices, three shielding configurations using aluminum sheets were evaluated. Simulations performed with FEMM confirmed the effectiveness of the screens. The type C shielding solution (placing sheets of aluminum alloy 1100, 0.5 mm thick, on the wall closest to the power line.) was selected for its effectiveness and lower cost compared to the other two options, successfully reducing the maximum induction to 14.4 μT .

Keywords: FEMM, Ampere's Law, Magnetic Field, Shielding, Finite element method.

1. INTRODUCCIÓN

Los campos electromagnéticos podrían poseer efectos nocivos sobre los seres humanos [1] por lo que la legislación nacional establece límites a los que trabajadores pueden estar expuestos.

Se trabajó en el problema donde por la vereda de una fábrica pasa una línea de 132 kV tipo bandera de 125 MVA. Se determinó que la exposición a campos magnéticos dentro de las oficinas de esta fábrica superaba el límite establecido por la normativa vigente en Argentina y se propuso una forma de apantallamiento en función de los resultados.

En la resolución 77/98 de la secretaría de energía inciso 4.2 se establece un límite de 25 μT de inducción magnética según el siguiente extracto [2]:

“Para atender los efectos en las personas debidos a la exposición a campos eléctricos y de inducción magnética, se adoptan valores de máximo límite extremo tendientes a orientar la elección de los diseños de las futuras instalaciones, teniendo en cuenta valores tan bajos como razonablemente alcanzables, y evitando los que puedan producir campos de inducción magnética más intensos que los típicos para las líneas existentes, tal como se indica en los puntos 4.1 y 4.2.”

En cambio, en normas internacionales como la IEEE Std C95.1-2020 observamos límites menos estrictos de 904 μT a 50 Hz para la cabeza y torso de las personas en ambientes no restringidos [3].

Como la normativa argentina establece un límite más conservador fue este el utilizado para la resolución del problema.

2. DESARROLLO

Las oficinas de la fábrica se encontraban según la disposición mostrada en la figura 1, todas las medidas son en milímetros.

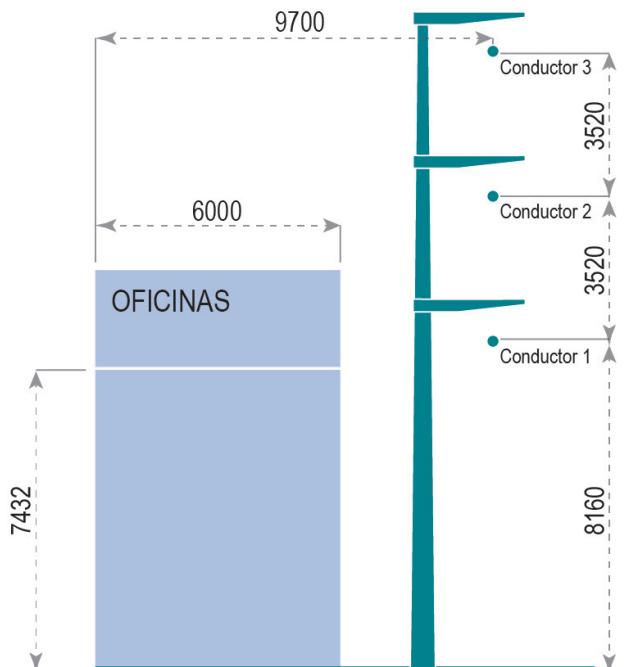


Figura 1. Disposición geométrica de oficinas y conductores de la línea de 132 kV.

Se utilizaron 2 métodos para calcular el campo magnético** dentro de las oficinas y verificar la robustez del valor obtenido por dos caminos diferentes.

La corriente eléctrica circulante por los cables de alta tensión es de 546,73 Amperes eficaces y 773,20 Amperes pico, esto se calculó según la máxima capacidad de transporte de esta línea que es de 125 MVA para una tensión de 132 kV. Se evaluó el sistema trifásico como simétrico y equilibrado.

2.1 Calculo por Ley de Ampere:

La Ley de Ampere describe que la circulación del campo magnético a lo largo de una trayectoria cerrada es proporcional a la corriente eléctrica neta que atraviesa esa trayectoria según la ecuación 1. Donde μ_0 ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m) es la permeabilidad del vacío, I es la corriente eléctrica en Amperes, l es el vector distancia desde el cable hasta el punto de estudio y B es el campo magnético en Teslas.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I \quad (1)$$

En este caso se trataba del campo magnético generado por una línea, por lo tanto, la integral de la ecuación 1 pudo resolverse obteniendo la ecuación 2 [4]:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (2)$$

Teniendo en cuenta que la línea estaba compuesta por 3 conductores fue necesario aplicar la ley de superposición. El valor total del campo magnético en un punto se calculó como la suma de los vectores de campo magnéticos producidos por cada conductor por separado. En la figura 2 podemos visualizar la descomposición de uno de los vectores de campo magnético, con r representando la distancia entre el conductor y el punto a verificar u observador, L y h son las descomposiciones en catetos del vector distancia. Una vez obtenido el vector, solo el módulo fue relevante para el análisis.

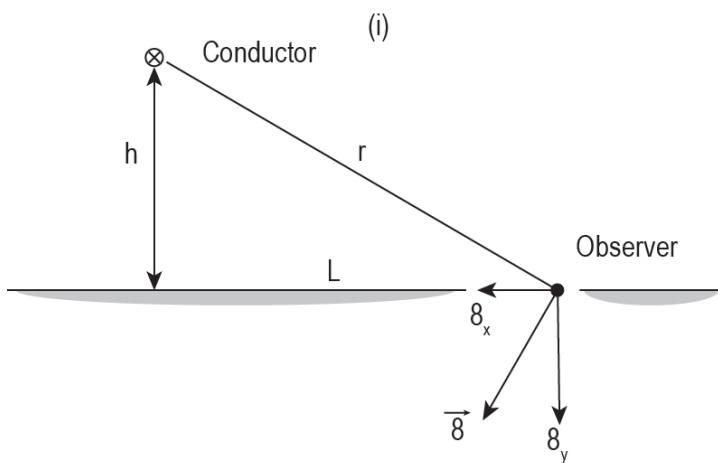


Figura 2. Composición del vector campo magnético.

**Aunque estrictamente en la física se diferencia intensidad de campo magnético H e inducción de campo magnético B cuando hablamos de campo magnético nos referimos a la última ya que, en la práctica, es el término más comúnmente relacionado a este.

2.2 Cálculo por elementos finitos

Se utilizó el programa FEMM (Finite Element Method Magnetics [5]) que emplea el método de elementos finitos. Esta técnica numérica es utilizada para resolver ecuaciones diferenciales, particularmente aquellas que describen fenómenos físicos como el electromagnetismo lo que permite simular y analizar campos magnéticos y eléctricos.

El método de elementos finitos se basa en la aproximación de la solución de una ecuación diferencial en un dominio continuo. Para ello, se divide el dominio en subdominios más pequeños y simples llamados elementos finitos. Dentro de cada elemento, la solución se aproxima mediante una función simple (por ejemplo, un polinomio). Luego, se utilizan métodos de ponderación y residuos (como el método de Galerkin) para asegurar que la solución aproximada satisfaga la ecuación diferencial de manera “promedio” en cada elemento. Esto resulta en un sistema de ecuaciones algebraicas que se resuelven para obtener los coeficientes de las funciones de aproximación, permitiendo reconstruir la solución en todo el dominio.

La metodología se basó en la simulación del caso, replicando las distancias de la figura 1 se llegó a la figura 3 dentro del programa, para esto se utilizaron las herramientas que incorporadas en el software [6]

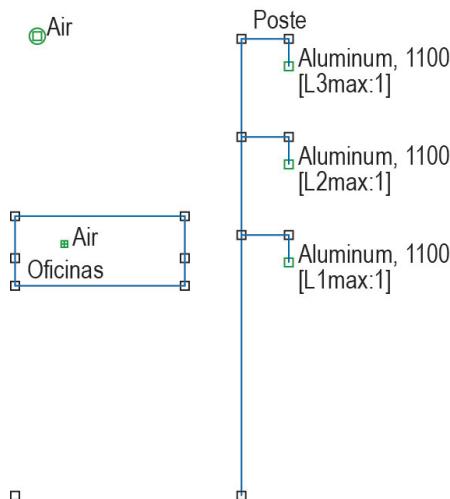


Figura 3. Simulación del caso en el software FEMM.

El tipo de modelo es 2D. La condición de contorno utilizada es abierta, utilizando la función automática del software IABC (Condiciones de Contorno Asintóticas Improvisadas), esta misma herramienta también aseguró un tamaño del dominio suficiente para la simulación sea correcta, logrando que las líneas de campo magnético lleguen a los bordes del dominio de forma casi perpendicular. El tamaño final de la malla fue definido como 0,1 m ya que cuadriculas mas pequeñas no cambiaban el resultado (tomando un máximo de 2 decimales).

2.3 Puntos de estudio

Se seleccionaron 60 puntos de estudio a una altura de 1 metro desde el piso de la oficina, detallado en la figura 4. Este valor tuvo en cuenta la altura que tiene una persona sentada en su

puesto de trabajo. Se estableció 1 punto cada 0,1 metros dado que la longitud de la oficina era de 6 metros, tomando los 0 metros desde la pared más próxima a la línea.

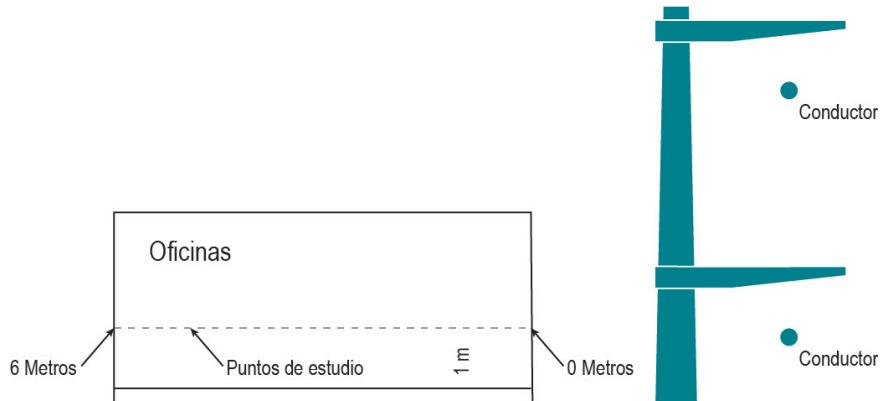


Figura 4. Puntos seleccionados para el estudio.

2.4 Máximos e instantáneos

Tanto en el cálculo por ley de Ampere como en la simulación por software, los resultados obtenidos fueron para un instante dado. El módulo de campo magnético obtenido en un punto no era constante ya que se trataba de una línea de corriente alterna.

Dependiendo geométricamente de la localización del punto a estudiar, el máximo se alcanzó para un diferente valor de corriente instantánea en cada conductor.

Teniendo en cuenta que se trató de un sistema trifásico equilibrado, para conocer el máximo en los puntos de estudio seleccionados se abordó de forma diferente para cada tipo de cálculo:

Ley de Ampere: Se calculó el valor máximo de campo magnético variando de a un grado la composición fasorial de la corriente en cada conductor que componía un sistema trifásico hasta cumplir un periodo completo.

FEMM: Como el software permitía cargar la corriente como un numero complejo, se pudo expresar las corrientes trifásicas como tales. El resultado devuelto por el software era también un número complejo, descompuesto en dos componentes, uno tangencial y otro normal al vector campo magnético. Cada componente se trataba de un fasor que podía ser expresado como una función coseno o seno:

$$B_t = \sqrt{B_{Re}^2 + B_{Im}^2} \cos \left(wt + atang \left(\frac{B_{Im}}{B_{Re}} \right) \right) \quad (3)$$

$$B_n = \sqrt{B_{Re}^2 + B_{Im}^2} \cos \left(wt + atang \left(\frac{B_{Im}}{B_{Re}} \right) \right) \quad (4)$$

En la ecuación 3 y 4, B_t ; B_n son los componentes tangenciales y normales respectivamente del vector campo magnético, Re_t ; Blm_t son la parte real e imaginaria respectivamente de la componente tangencial, BR_{n_t} ; Blm_n son la parte real e imaginaria respectivamente de la componente normal, w es la frecuencia angular y t es el tiempo.

El módulo del vector campo magnético B era la composición de esos fasores en cada instante según la ecuación 5:

$$|\vec{B}| = \sqrt{B_t^2 + B_n^2} \quad (5)$$

Variando el tiempo en un periodo completo se tomó el valor máximo que alcanzó el módulo del campo magnético. En la figura 5 graficamos la variación en el tiempo del modulo del campo magnético del punto de estudio mas cercano a la linea sin apantallar.

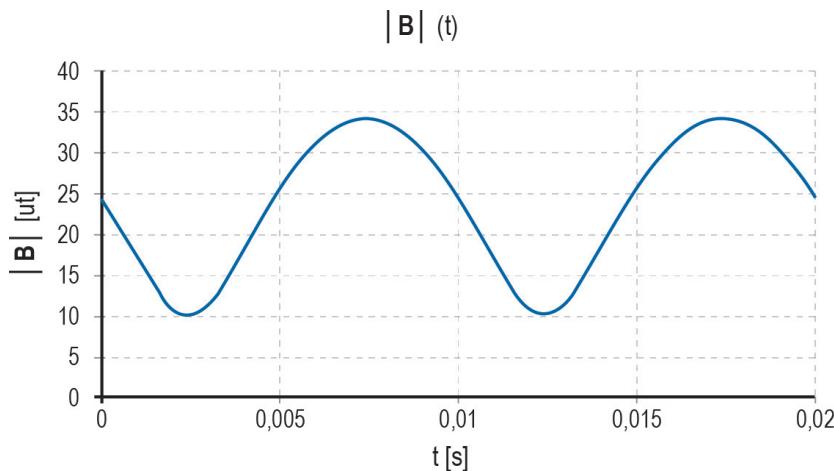


Figura 5. Variación del módulo del campo magnético.

Solución propuesta

Cuando un campo magnético variable atraviesa una chapa de un material conductor (pantalla), induce una corriente eléctrica dentro del material. Este es el principio de la inducción electromagnética descrito por la ley de Faraday. Estas corrientes fluyen en bucles cerrados dentro del conductor y son denominadas corrientes de Foucault.

Según la ley de Lenz, la corriente inducida genera su propio campo magnético que se opone al cambio que lo produjo. El resultado es que el campo magnético de las corrientes inducidas contrarresta al campo magnético que lo atraviesa, atenuándolo. Este efecto es el predominante para campos magnéticos de bajas frecuencias como es el de este caso.

En la Argentina el material más conveniente para utilizar en la pantalla es aluminio por su disponibilidad y precio. El espesor de las placas de apantallamiento fue de 0,5 mm dado que es el mínimo económicamente competitivo ofrecido en el mercado. La lógica detrás de esto se basa en la producción y la demanda del mercado local.

El espesor de 0,5 mm se ha consolidado como un estándar en la industria de la construcción y manufactura. Se utiliza para aplicaciones que requieren un material liviano, maleable y resistente a la corrosión. La alta demanda de este espesor por parte de diversas industrias ha llevado a una producción masiva. Esta economía de escala reduce los costos de fabricación y distribución, lo que se traduce en un precio final más bajo y una disponibilidad generalizada.

Los espesores más finos, como el de 0,3 mm o incluso el "foil", tienen aplicaciones más específicas, como en la industria del embalaje o componentes electrónicos. Su demanda es más limitada y, en muchos casos, son productos importados o requieren procesos de fabricación más especializados. Esto hace que su disponibilidad sea menor y su precio por unidad sea más alto.

Esto se basa en el análisis de los catálogos y listados de precios de distribuidores de metales no ferrosos en Argentina. Ejemplos de estas empresas son J. L. Metales, Pagani S.A. y Alumina Argentina, que suelen ofrecer el espesor de 0,5 mm como uno de los más comunes y con mayor stock. Adicionalmente, se ha tomado en cuenta la oferta de productos en plataformas de comercio en internet como MercadoLibre, donde los rollos y chapas de aluminio de 0,5 mm son los más abundantes y presentan la mayor variedad de precios.

Se utilizó el FEMM para probar distintas configuraciones de pantallas ubicadas directamente sobre la superficie externa hasta encontrar la mejor solución técnico-económica. La conductividad del aluminio utilizada es de 34,45 MS/m siendo esta aleación 1100.

Se probaron 3 formas de pantallas diferentes, ver figura 6. Las cuales son:

- Pantalla A: Placa superior e inferior desde el punto más cercano de la oficina a la línea hasta 1 metro de longitud que fue el punto donde $|B|$ disminuyó por debajo de los 25 μT . Además, se incluyó una placa en la pared más cercana a la línea.
- Pantalla B: Placa superior e inferior desde el punto más cercano de la oficina a la línea hasta 1 metro de longitud que fue el punto donde $|B|$ disminuyó por debajo de los 25 μT .
- Pantalla C: Solamente una placa en la pared más cercana a la línea

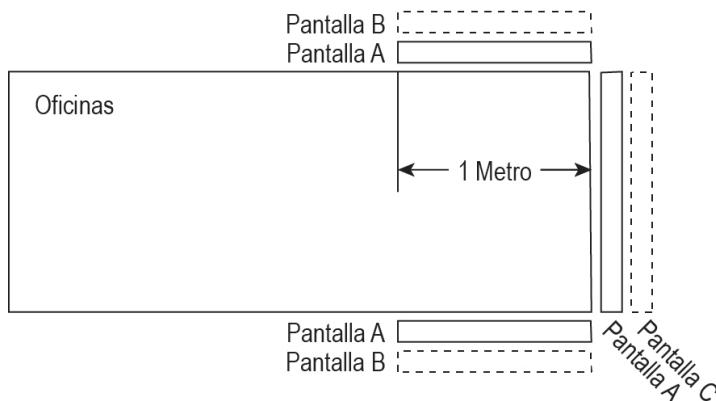


Figura 6. Métodos de pantalla propuestos.

3. Resultados

Los resultados se obtuvieron por dos métodos distintos para los puntos especificados, tanto sin apantallamiento como con tres tipos de pantalla. La figura 7 muestra la comparación del campo magnético obtenido por ambos métodos sin apantallamiento, donde el error relativo no superó el 1,4% a los 0 metros y disminuyó a 0,4% a los 6 metros. Es importante destacar que, a 1 metro de la pared más cercana a la línea, se superó el límite de 25 μT . Además, la figura 8 compara los valores obtenidos para las diferentes configuraciones de apantallamiento (A, B y C).

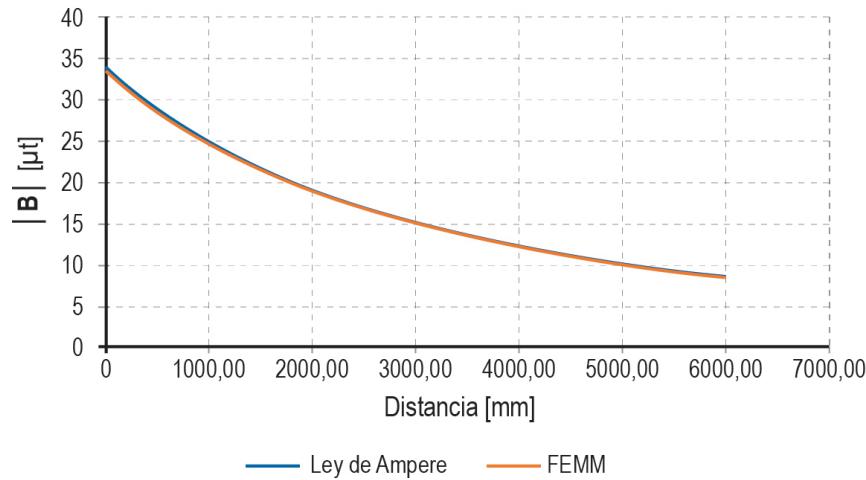


Figura 7. Comparación del campo magnético por los 2 métodos.

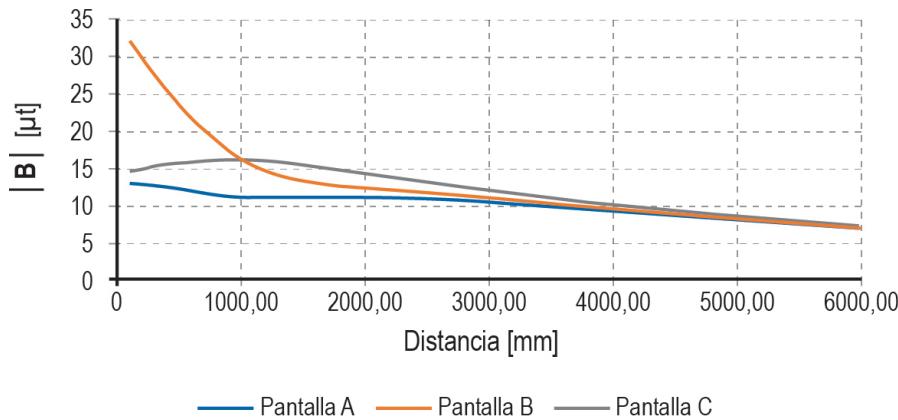


Figura 8. Comparación de los valores obtenidos para diferentes formas de apantallamiento.

Para cada caso, se representaron las zonas donde se superó el límite establecido de 25 μT . La figura 9 ilustra el escenario sin apantallamiento, mientras que las figuras 10, 11 y 12 muestran los casos apantallados con los tipos A, B y C, respectivamente. En estos gráficos, el color celeste corresponde a las zonas por debajo del umbral y el magenta a las zonas por encima. Es relevante mencionar que los resultados de estas simulaciones, realizadas con el software FEMM, corresponden a un valor instantáneo de corriente, por lo que el módulo del campo magnético mostrado no representa el módulo máximo.

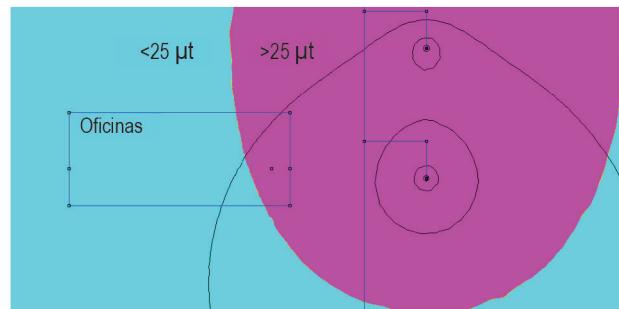


Figura 9. Sin pantalla, zonas donde se superó el umbral 25 µT.

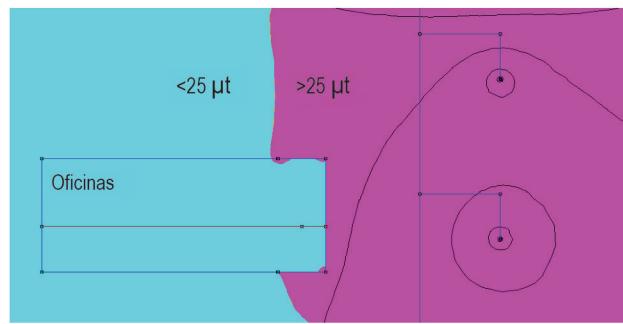


Figura 10. Pantalla tipo A, zonas donde se superó el umbral 25 µT.



Figura 11. Pantalla tipo B, zonas donde se superó el umbral 25 µT.



Figura 12. Pantalla tipo C, zonas donde se superó el umbral 25 µT.

Finalmente, los resultados de la reducción de la densidad de flujo magnético para cada configuración se compararon en la Tabla 1, tomando como referencia las distancias detalladas en la figura 4.

Distancia [m]	Sin Pantalla [μ T]	Pantalla C [μ T]	Reducción
0,1	32,60	14,49	55,55%
0,2	31,48	14,65	53,46%
0,3	30,35	15,06	50,36%
0,4	29,33	15,36	47,65%
0,5	28,43	15,49	45,52%
1,0	24,43	15,90	34,93%
2,0	18,69	14,01	25,05%
3,0	14,66	11,71	20,13%
4,0	11,78	9,76	17,18%
5,0	9,67	8,20	15,23%
6,0	8,20	7,07	13,68%

Tabla 1. Tabla de resultados obtenidos de campo magnético y su reducción.

4. Discusión

En este trabajo se implementaron dos métodos para calcular módulo del campo magnético máximo dentro de un ambiente de trabajo cercano a una línea de 132 kV.

En primer lugar, se observó que la implementación de los dos métodos arrojó resultados consistentes entre ellos como se muestra en la figura 7. Es posible interpretar esto como una evidencia de que los resultados obtenidos eran confiables. En base a estos resultados, se decidió realizar los siguientes cálculos utilizando la herramienta FEMM que facilitó en gran medida estos mediante la simulación de los distintos escenarios.

En base a los materiales disponibles en nuestro país y su costo, se decidió utilizar chapa de aluminio aleación 1100 de 0,5 mm de espesor, la cual demostró ser suficiente para lograr el apanllamiento buscado. Por este motivo no fue necesario probar láminas de mayor espesor, ya que se buscó la solución más económica. Además, se pusieron a prueba 3 posibles formas de apantallamiento para encontrar la que proveyera la mejor relación costo beneficio.

De los 3 tipos de pantallas utilizados el tipo B resultó poco efectivo para disminuir el campo magnético dentro de la oficina como se muestra en la figura 8 y 11. En el tipo A se obtuvieron los mejores resultados de reducción de campo que se visualizan en la figura 8 y 10, pero también es la que más superficie de aluminio requiere. El tipo C arrojó resultados aceptables a una menor superficie de aluminio como se representa en la figura 8 y 12.

Las oficinas tenían una altura de 2,5 metros y 16 metros de longitud por lo cual el tipo de pantalla C requería 40^2 de chapa de aluminio. La Pantalla A suma a esto 1 metro horizontal en el piso y techo siendo 72^2 .

Una chapa de aluminio de 0,5 mm de espesor tenía un precio aproximado de \$ 18.500 x al 8 de mayo de 2025 [7]

Por lo cual el precio solo por los materiales se requería:

- Pantalla tipo A – \$ 1.332.000
- Pantalla tipo C - \$ 740.000

Teniendo en cuenta que una pantalla Tipo A requería un 80% más de inversión que un tipo C y las ganancias de reducción de campo magnético no eran de gran importancia ya que ambos se encontraban por debajo del umbral límite, la mejor solución tecno-económica era colocar una pantalla tipo C que implicaba poner chapas de aluminio de 0,5 mm sobre la pared más cercana a la línea.

Aunque esta solución es suficiente para el modelo teórico simulado en FEMM, carece del respaldo de mediciones de campo en situaciones reales. Estas mediciones son cruciales para validar la exactitud del modelo propuesto o para identificar las modificaciones necesarias para que se ajuste mejor a la realidad.

5. Conclusión

Los efectos producidos por campos magnéticos de baja frecuencia siguen siendo un punto de discusión dentro de la comunidad científica ya que no se puede afirmar o descartar sus efectos sobre la salud [1]. Debido a esto cada ente gubernamental establece un valor límite el cual entiende asegurar la salud del personal expuesto a estos campos.

El trabajo realizado permitió establecer los valores de campo magnético máximo encontrados en las oficinas próximas a una línea de 132 kV, verificando el incumplimiento de la normativa vigente en argentina sobre exposición a campos magnéticos de baja frecuencia (Resolución 77/98 de la Secretaría de Energía).

A partir del análisis realizado se llegó a una solución teórica y se concluyó que la pantalla tipo C era la opción más adecuada desde un punto de vista tecno-económico para reducir el campo magnético en las oficinas. Aunque la pantalla tipo A ofrecía una mayor reducción del campo, su costo significativamente era más alto y no justificaba la inversión adicional, especialmente cuando ambos tipos de pantalla lograban mantener el campo magnético por debajo del umbral límite. Por ende, la implementación de la pantalla tipo C, que requería menos superficie de aluminio y una inversión menor, era la solución óptima que equilibraba efectividad y costos.

6. Referencias

- [1] Vernieri, J. Z., & Riubrugent, J. (1997). "Efecto de los campos electromagnéticos alternos producidos por líneas de transmisión en los seres humanos. In VII Encuentro Regional Latinoamericano del CIGRE" [en línea] (ERLAC) (Puerto Iguazú, 1997). Disponible en: https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/45595/Documento_completo__.pdf?sequence=1
- [2] Resolución 77/98 de la secretaria de energía. [en línea]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-77-1998-49781/texto>
- [3] IEEE Standards Association, Norma IEEE para los niveles de seguridad con respecto a la exposición humana a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos, de 0 Hz a 300 GHz, IEEE Std C95.1-2020, abril de 2020.

- [4] C. Garym, R. Cortina, F. Hirsch, B. Holmgren, D. Kohoutova, N. Kolcio, J. Looms, C. Malaguti, P. Pirotte, A. W. Van Der Weegen (1980). "Campos magnéticos y eléctricos producidos por sistemas de transmisión. Descripción del fenómeno y guía para calculo". CIGRE, 4, 83-85
- [5] Meeker, D. Finite Element Method Magnetics. <https://www.femm.info/wiki/HomePage>, [Última fecha de acceso: 3 de Mayo de 2025].
- [6] Meeker, D. Finite Element Method Magnetics – Manual de usuario version 4.2
- [7] Alumina, Precio de chapas de aluminio en Argentina – <https://www.alumina-argentina.com.ar/aluminio/chapas-de-aluminio/chapas-lisas/?mpage=4>, [Última fecha de acceso: 3 de mayo de 2025].

ESTUDIO DE FALLAS DE UN EJE REDUCTOR

Cataldo Agustín¹, Rivarola Micaias², Stein Hernán³, Scuderi Luciano⁴, Bidegaray Horacio⁵

^{1,5}: Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Avellaneda, Departamento de Ingeniería Mecánica Avda. Mitre 5050 Avellaneda (1874) Pcia De Buenos Aires -Argentina

*Autor a quien se debe dirigir la correspondencia: acataldo1997@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Este informe detalla el análisis de la falla en el chavetero del árbol veloz de un reductor, componente clave en una máquina de distribución y producción continua. El objetivo principal es identificar la causa raíz de esta avería, para lo cual se proponen y exploran tres posibles modos de falla. En el desarrollo del estudio, se describirán las metodologías y el razonamiento empleados para llegar a las conclusiones.

Se llevará a cabo una investigación exhaustiva de las propiedades mecánicas del árbol. Estos ensayos permitirán determinar la homogeneidad de la propiedad en el componente y, de manera crucial, en la zona cercana a la falla. Además, se caracterizará el material del árbol analizando su microestructura, tamaño de grano e inclusiones para entender su comportamiento. Esto nos ayudará a observar si las propiedades del material en las proximidades de la falla se mantuvieron similares o si fueron alteradas como consecuencia de la misma.



Figura 1: imagen del conjunto (derecha) imagen del modo de falla (Izquierda)

2. Hipótesis de trabajo:

Para determinar las causales del modo de falla del chavetero, plantearemos y desarrollaremos las siguientes hipótesis:

- Falla por propagación de fisura debido a fatiga: Consideramos que la falla pudo originarse por la propagación de una fisura generada por fatiga en el chavetero. Esto sería consecuencia de la concentración de tensiones en dicha área. Analizaremos matemáticamente la propagación de esta fisura utilizando la Ley de Paris.
- Diseño o material inadecuado del eje: Proponemos que la falla pudo deberse a una selección deficiente en el diseño del eje. Esto podría implicar una elección inapropiada del material, un diseño estructural del eje que no soportara las cargas esperadas, o una aplicación incorrecta de algún tratamiento térmico durante su fabricación.
- Uso o mantenimiento deficiente: Otra hipótesis es que un uso inapropiado o un mantenimiento inadecuado de la pieza hayan contribuido directamente a la generación de la falla. Esto incluye desde sobrecargas operacionales hasta la falta de revisiones periódicas.

El análisis de los modos de falla se fundamentará en los conceptos de cátedra de la asignatura Ingeniería Mecánica 3, complementados con conocimientos específicos en Materiales Metálicos.

3. Estudio microestructural

3.1 Abordaje del Estudio de la Falla

Para investigar la falla del chavetero, iniciaremos con un análisis metalográfico. Este nos permitirá una aproximación del material utilizado y determinar si se aplicaron tratamientos térmicos como temple o revenido.

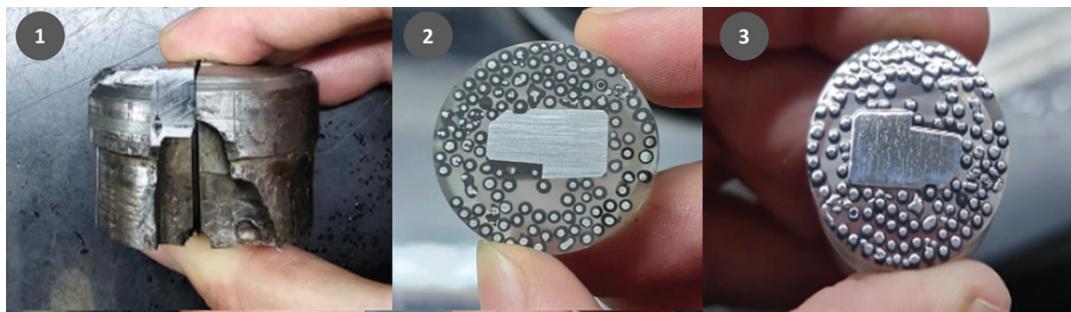
3.2 Análisis Metalográfico - Metodología:

Los estudios se realizaron en el Laboratorio de Metalografía y Tratamientos térmicos del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UTN Regional Avellaneda. Contamos con la colaboración de los docentes, Ing. Germán Zaupa y el Ing. Rodrigo Samames de materiales metálicos, quienes nos guiaron en el estudio microestructural para determinar el origen de la falla.

Entre las formas posibles para realizar el ensayo metalográfico se consideran los ensayo microscópico y/o macroscópico.

En ambos métodos se obtendrán datos de la pieza. Dependiendo del método, algunos datos de resultados tendrán mayor exactitud en el estudio de la falla que otros.

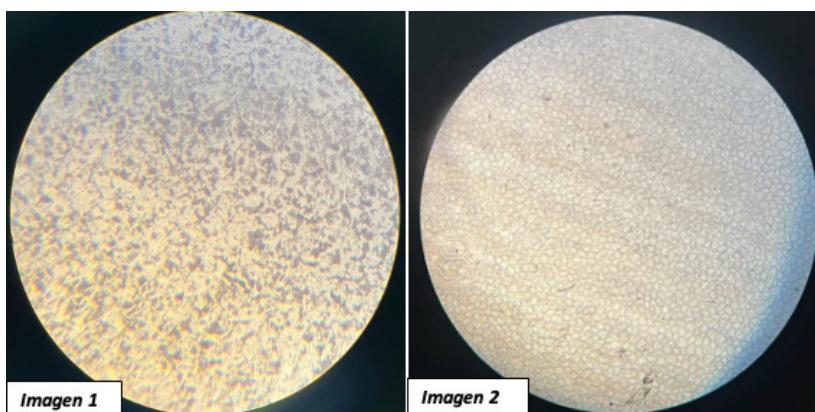
El ensayo microscópico tiene la peculiaridad de que se debe preparar la probeta antes de realizarle el ensayo debido a que una mala preparación de la misma podría proporcionarnos datos erróneos



Etapas de la preparación de probetas en el Laboratorio de Metalografía de la UTN FRA

3.2.a. Descripción de las etapas de preparación:

1. Selección y Extracción de la Muestra: La elección del lugar de donde se extrae la muestra es fundamental, dependiendo de los datos que se busquen, la geometría de la pieza y las condiciones del metal
2. Montaje y creación de inclusión: Su propósito principal es encapsular la muestra en un bloque sólido y más manejable. Esto no solo facilita la manipulación durante el desbaste y pulido, sino que también protege los bordes delicados de la muestra de posibles redondeos o daños, y ayuda a mantener la superficie a analizar perfectamente plana, crucial para una observación microscópica precisa
3. Desbaste y Pulido: Una vez montada la probeta, los siguientes pasos son el desbaste y el pulido, fundamentales para obtener una superficie apta para la observación microscópica.
4. El paso siguiente es el Ataque Metalográfico: resulta una etapa crucial que sucede al pulido y tiene como finalidad revelar la estructura interna de la probeta. Este proceso se logra mediante la aplicación de un reactivo químico sobre la superficie pulida. La acción del reactivo provoca una disolución selectiva de la superficie, lo que significa que ataca diferencialmente las distintas fases presentes en el material o las áreas con diferentes orientaciones cristalinas. Esta disolución selectiva hace que los límites de grano y las diferentes fases microestructurales se hagan visibles al microscopio.



Resultado ataque metalográfico dos imágenes

3.2.b. Objeto del informe:

Observar la estructura de un acero al carbono para determinar fases, microconstituyentes y posibles tratamientos térmicos.

Estimado Material analizado: Acero Hipoeutectoide.

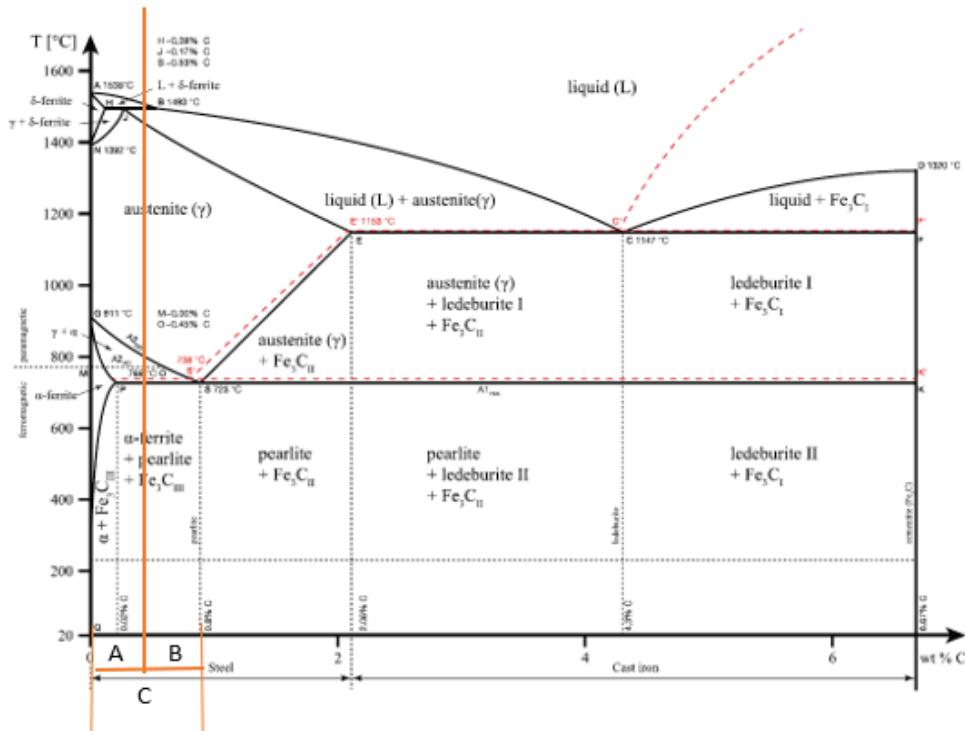
Análisis Metalográfico:

- I. Heterogeneidades: Estructura Homogénea.
- II. Tratamientos Térmicos: Probablemente un temple sin terminar pero no se puede asegurar.
- III. Estructura: Atacada con Nital 5%
- IV. Referencias Micrografías: La micrografía de la imagen 1 tiene un aumento de x400. Y la micrografía de la imagen 2 tiene 100x
- V. Inclusiones no metálicas: Óxidos Globulares.
- VI. Tamaño de grano: Con la imagen 2 estimado T.G. 1
- VII. Observaciones: se puede observar una microestructura con tamaño de grano muy chico lo cual pudo haber sido el factor por el cual la pieza a la hora de realizar la probeta generó grandes dificultades para cortar la sección a estudiar y analizar. Debido a esta circunstancia no se pudo determinar el tamaño del grano.

Microconstituyentes: Perlita y Ferrita (SSa). Fases: SSa y Cm

4. Resultados:

Una vez realizados los ensayos de micrografías, podemos deducir mediante la regla de la palanca una aproximación de que tipo de acero se trata la pieza en un diagrama Fe-C:



$$\%SSa = \left(\frac{0.8\% - x}{0.8 - 0.008} \right) * 100\% \cong 45\% \text{ o } 50\%$$

Por lo tanto a la hora de hacer los despejes correspondientes nos queda que:

$x = 0.4436$ si es $\%SSa = 50\%$

$x = 0.404$ si es $\%SSa = 45\%$

Podemos observar una microestructura con proporciones similares de ferrita y perlita. Esta característica nos permite aplicar la regla de la palanca para estimar el porcentaje de carbono y, consecuentemente, el tipo de acero.

Basándonos en la cantidad de carbono calculada y considerando los materiales más comunes para la fabricación de ejes, las opciones más probables son aceros como el SAE 1040, SAE 1045 o SAE 4140.

Después de realizar el ensayo metalográfico y obtener una aproximación de los posibles materiales, tanto por el contenido de carbono como por los materiales usualmente empleados en árboles de transmisión de reductores, se llevó a cabo un análisis de chispa en el material, directamente en un laboratorio externo. Este análisis arrojó los siguientes datos:

Resultados de Medida



Instrumento	67B1032						19.06.2025 11:44:27
Muestra	Eje Reductor Falla						
Aleación	FE_T_100	Modo	Concentración de Elemento				
	Fe [%]	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]
1	97,1	0,433	0,261	0,807	0,0099	<0,0030	0,992
2	97,0	0,418	0,267	0,820	0,0229	<0,0030	1,00
3	96,8	0,426	0,285	0,882	0,0340	<0,0030	1,05
Ø	96,9	0,426	0,271	0,837	0,0223	<0,0030	1,02
RSD	0,15	1,76	4,59	4,79	54,29	0,00	3,21
	Mo [%]	Ni [%]	Al [%]	Co [%]	Cu [%]	Nb [%]	Ti [%]
1	0,212	0,0237	0,0354	0,0084	0,0298	0,0077	0,0040
2	0,228	0,0259	0,0356	0,0086	0,0328	0,0082	0,0045
3	0,259	0,0259	0,0330	0,0086	0,0347	0,0091	0,0054
Ø	0,233	0,0252	0,0347	0,0085	0,0324	0,0083	0,0047
RSD	10,31	5,23	4,11	1,42	7,71	8,93	15,67
	V [%]	W [%]	Pb [%]	Sn [%]	B [%]	Ca [%]	Zr [%]
1	0,0072	<0,0250	<0,0150	0,0144	<0,0010	0,0017	0,0028
2	0,0073	0,0356	<0,0150	0,0174	<0,0010	0,0030	0,0041
3	0,0081	0,0417	<0,0150	0,0193	<0,0010	0,0016	0,0035
Ø	0,0075	0,0341	<0,0150	0,0170	<0,0010	0,0021	0,0034
RSD	6,95	24,76	0,00	14,68	0,00	37,58	18,53
	As [%]	Bi [%]					
1	0,0314	<0,0150					
2	0,0411	<0,0150					
3	0,0495	<0,0150					
Ø	0,0407	<0,0150					
RSD	22,28	0,00					

De Tabla de materiales podemos observar que se trata de un acero IRAM 4140

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,38 - 0,43	$\leq 0,4$	0,75 - 1	$\leq 0,035$	$\leq 0,04$	0,8 - 1,1	0,15 - 0,25

El acero de aleación SAE 4140 suele suministrarse con un tratamiento térmico de dureza de 18-22 HRC.

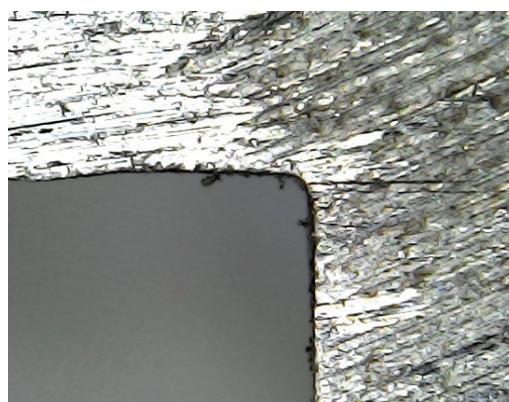
Mediante un ensayo de dureza Rockwell, realizado en el laboratorio del departamento de ingeniería mecánica, dio como resultado en cada una de las tres impresiones los siguientes valores de dureza: 21HRC; 21.5HRC; y 22HRC



5. Discusión, análisis de Hipótesis:

5.1 Falla por propagación de fisura debido a fatiga:

Consideramos que la falla pudo originarse por la propagación de una fisura generada por fatiga en el chavetero. Esto sería consecuencia de la concentración de tensiones en dicha área. La concentración de tensiones es un fenómeno que ocurre cuando en una pieza sometida a carga aparecen zonas localizadas con tensiones mucho mayores que en el resto del material, debido a cambios geométricos o discontinuidades como agujeros, ranuras, entallas, grietas, filetes, roscas o soldaduras.



Aunque una pieza esté sometida a una carga uniforme, estos cambios hacen que el flujo de tensiones se altere, provocando acumulación en ciertas áreas, lo que puede ser el inicio de una falla, especialmente por fatiga o fractura. Este concepto es esencial en ingeniería para evitar fallas prematuras en estructuras o componentes mecánicos.

Durante el proceso de inspección de los cortes realizados en el árbol, se pudo observar mediante el uso de microscopía y software de diseño asistido por computadora, SolidWorks, que el radio de acuerdo en la base del chavetero es de 0,4 mm (Fotografía 15). Este valor resulta crucial para el análisis del origen de una posible fisura, ya que los radios pequeños en zonas de cambio geométrico suelen actuar como concentradores de tensiones y, por lo tanto, como puntos críticos donde pueden iniciarse fallas.

Para evaluar el impacto de este radio en el comportamiento del componente, se recurrió al gráfico de factores de concentración de tensiones. Este gráfico relaciona, en el eje horizontal (abscisas), la razón entre el radio de concordancia y el diámetro del árbol, mientras que en el eje vertical se representa el factor de concentración de tensiones teórico (K_{ts}).

En este caso particular, la relación entre radio y diámetro es:

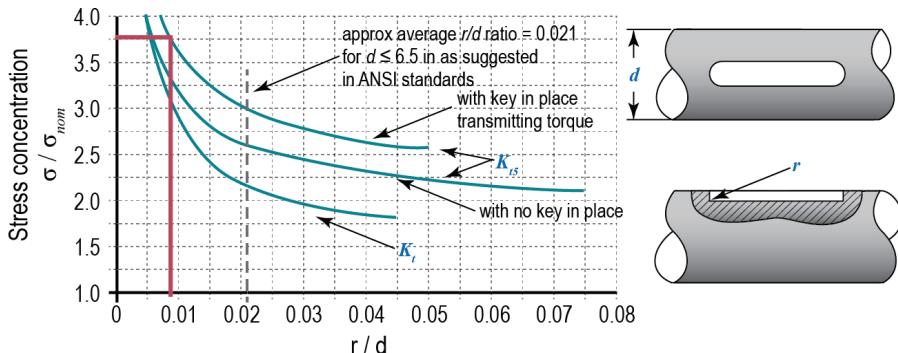
$$K_{ts} = \frac{\text{Radio de acuerdo al chavetero}}{\text{Diámetro del eje}}$$

$$K_{ts} = \frac{0,4 \text{ mm}}{50 \text{ mm}}$$

$$K_{ts} = 0,008$$

Al ubicar este valor en el gráfico, se obtiene un factor de concentración de tensiones $K_{ts} \approx 3,75$ (Grafico 1). Esto indica que, en esa zona específica del chavetero, las tensiones reales deben aumentarse en un 3,75 veces respecto a la tensión nominal de trabajo.

The figure below shows stress-concentration factors for an end-milled keyseat in shafts in bending K_t and in torsion $K_{t\sigma}$. Study the graph and fill in the missing words.



Este valor debe considerarse durante el dimensionamiento del árbol ya que, si no se incluye este factor en los cálculos, se estaría subestimando la tensión real a la que está sometido el material en dicha región. Como consecuencia, el material y sus dimensiones podrían ser insuficientes para soportar las cargas reales, lo que compromete la integridad del sistema.

Es importante remarcar que, si bien un radio de acuerdo mayor puede reducir el factor K_{ts} , existe una limitación geométrica y funcional: un radio excesivo podría impedir el correcto asiento de la chaveta en su ranura, generando así modos de falla adicionales (flexión, contacto irregular), distintos del corte puro para el que fue diseñada. Por lo tanto, se trata de una solución de compromiso entre minimizar concentraciones de tensiones y asegurar la correcta funcionalidad del ensamblaje mecánico.

Finalmente, se debe considerar que la posible fisura se originaría justamente en esta zona de alta concentración de tensiones. Su propagación respondería a un mecanismo de fatiga, que puede describirse mediante la Ley de Paris, la cual relaciona la velocidad de propagación de la fisura con el rango de tensiones aplicadas en cada ciclo de carga.

La *Ley de Paris* es un modelo empírico fundamental dentro de la mecánica de fractura que describe el crecimiento de grietas en materiales sometidos a cargas cíclicas. Su propósito principal es unificar los datos experimentales de propagación de grietas por fatiga, los cuales anteriormente se explicaban parcialmente mediante otras leyes, y proporcionar un método práctico para caracterizar este fenómeno.

Esta ley se aplica en el régimen elástico de propagación de grietas, bajo el supuesto de que la zona plástica en el extremo de la grieta es lo suficientemente pequeña como para que el material, en su conjunto, se comporte elásticamente. Esto permite utilizar los principios de la mecánica de fractura elástica lineal (LEFM).

Aunque es una ley empírica, la *Ley de Paris* es una de las herramientas más utilizadas en el análisis de fatiga debido a su simplicidad y precisión dentro de ciertos límites. Sus principales restricciones son:

- Solo es válida en ciclos de carga de amplitud constante.
- No debe aplicarse en condiciones de impacto
- No contempla efectos significativos de la frecuencia ni de la forma de la onda de carga.

Gracias a su formulación simple y directa, la Ley de Paris permite estimar la vida útil en fatiga de un componente. Integrando la ecuación entre un tamaño de grieta inicial a_i y uno crítico a_f , se obtiene el número de ciclos hasta la falla N_f .

Este enfoque ha transformado el diseño de componentes estructurales, permitiendo prevenir fallas catastróficas mediante una evaluación más rigurosa del crecimiento de grietas. La Ley de Paris representa, por tanto, un hito clave en la evolución de la mecánica de fractura y en la ingeniería de materiales.

5.2. Diseño o material inadecuado del eje:

Se considera que la falla del eje pudo haber sido originada por una selección inadecuada en el diseño, ya sea en la elección del material, en las características geométricas del componente, o en el tratamiento térmico aplicado durante su fabricación.

Según lo indicado en el informe, el eje fue fabricado en acero SAE 4140, una aleación de baja aleación reconocida por su elevada resistencia mecánica, buena tenacidad y maquinabilidad. Este acero es comúnmente utilizado en aplicaciones críticas como ejes, engranajes y otros componentes sometidos a esfuerzos cíclicos, debido a su adecuada resistencia al desgaste y a la fatiga. Además, presenta una buena templabilidad, lo que permite alcanzar elevadas durezas mediante tratamiento térmico, incluso en secciones de espesor considerable.

No obstante, los análisis realizados evidenciaron un tamaño de grano extremadamente fino, incluso inferior al mínimo establecido por la norma ASTM E112. Si bien un tamaño de grano reducido puede aumentar la resistencia mecánica, también puede presentar desventajas, tales como una disminución de la ductilidad, menor tenacidad y mayores dificultades en el mecanizado. En casos extremos, un grano excesivamente fino puede afectar la estabilidad microestructural del material, favoreciendo la aparición de mecanismos de deformación como el deslizamiento por bordes de grano, que pueden convertirse en sitios preferenciales para la nucleación de fisuras por fatiga.

Este tamaño de grano inusualmente pequeño podría estar relacionado con la aplicación de un tratamiento térmico incompleto o mal ejecutado. El análisis metalográfico no evidenció la presencia de estructuras martensíticas, lo cual sugiere que dicho tratamiento no se realizó correctamente o no fue finalizado.

Adicionalmente, se observó que en la zona del chavetero no se previó un radio de concordancia adecuado, lo cual, sumado al grano extremadamente fino del material, habría generado concentraciones de esfuerzo significativas. Esta combinación de factores pudo haber favorecido la iniciación y propagación de fisuras por fatiga en dicha zona.

En base a lo expuesto, se concluye que la falla del componente se habría originado por una fisura iniciada en el chavetero, producto de un diseño inadecuado y condiciones metalúrgicas desfavorables.

5.3. Uso o mantenimiento deficiente.

Otra hipótesis es que un uso inapropiado o un mantenimiento inadecuado de la pieza haya contribuido directamente a la generación de la falla. Esto puede incluir desde sobrecargas operacionales hasta la falta de inspecciones y revisiones periódicas.

Es posible que el equipo haya sido sometido a esfuerzos superiores a su tensión admisible de trabajo, lo cual generó una deformación progresiva y la aparición de fisuras intergranulares. Esto se debe a que las estructuras metalográficas se reordenaron plásticamente, favoreciendo la formación de grietas.

Además, el chavetero pudo haber sido mecanizado fuera de tolerancia, lo que habría provocado que la chaveta trabajara con cierta holgura. Esta holgura, con el paso de los ciclos de operación, habría aumentado, haciendo que la chaveta no solo trabajara a corte (como fue diseñada), sino también a flexión debido al juego excesivo. Esto habría generado solicitudes no previstas ni calculadas en el diseño original, comprometiendo la integridad del conjunto.

6. Conclusiones:

A partir del análisis realizado sobre el chavetero del árbol veloz del reductor, se concluye que la falla observada se originó muy probablemente por un mecanismo de fatiga inducido por concentraciones de tensiones en una zona geométricamente crítica, particularmente en el radio de acuerdo del chavetero. Esta hipótesis se sustenta en la observación metalográfica, los resultados del ensayo de dureza, y la caracterización del material, que evidenciaron una estructura de grano muy fino y un acero tipo SAE 4140 tratado térmicamente.

El estudio metalográfico confirmó la homogeneidad del material y la presencia de inclusiones no metálicas, mientras que los ensayos de dureza mostraron valores consistentes con tratamientos

térmicos incompletos o no óptimos. Esto refuerza la posibilidad de una selección inadecuada o ejecución deficiente del tratamiento térmico durante la fabricación del componente.

Asimismo, no puede descartarse la contribución de factores operativos, como sobrecargas cíclicas o un mantenimiento deficiente, los cuales podrían haber acelerado la iniciación y propagación de la fisura por fatiga. También se identificaron detalles de diseño que comprometen la integridad del componente, como un radio de chavetero reducido que favorece la concentración de tensiones.

En conjunto, los hallazgos permiten afirmar que la falla fue de tipo multifactorial, producto de una combinación entre un diseño geométrico crítico, posibles deficiencias metalúrgicas y condiciones de operación exigentes. Este caso pone de manifiesto la importancia de integrar adecuadamente el diseño mecánico con la selección de materiales, los tratamientos térmicos y las condiciones reales de servicio para evitar fallas prematuras en componentes críticos.

Bibliografía de referencia:

José Luis Arana y Javier Jesús González (2002) Mecánica de fractura, Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.

Samames R. – Zaupa G. (2024) Clasificación de aceros – apunte digital de catedra Materiales Metálicos UTN Facultad Regional Avellaneda.

Samames R. – Zaupa G. (2023) Tratamientos térmicos aceros e isotérmicos – apunte digital de catedra Materiales Metálicos UTN Facultad Regional Avellaneda.

Dattilo E, Sama M. (2025) “Estudio de fallas” apunte digital de catedra Ingeniería Mecánica III UTN Facultad Regional Avellaneda.

Nota: el trabajo fue realizado en el marco de la actividad práctica “estudio de fallas” de la asignatura Ingeniería Mecánica III. Prof. Ing. Eugenio Dattilo.

Agradecimientos:

A los profesores de la cátedra de materiales metálicos Ing. Zaupa German e Ing. Samames Rodrigo por permitir el uso de las instalaciones y equipos del Laboratorio de Metalografía y guiarlos en el análisis y estudio de la falla para realizar el ensayo metalográfico y la realización de la actividad práctica.

Al Ing. Sama Marcelo por brindarnos el laboratorio de Mediciones y Ensayos para realizar el ensayo de dureza Rockwell.



Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Avellaneda
Av. Ramón Franco 5050 - Código Postal: 1874 - Villa Domínico - Buenos Aires - Argentina
Tel: (54-11) 4353-0220 int. 105 - Fax: (54-11) 4353-0221
www.fra.utn.edu.ar - cienciaytecnologia@fra.utn.edu.ar - rumbostecnologicos@fra.utn.edu.ar