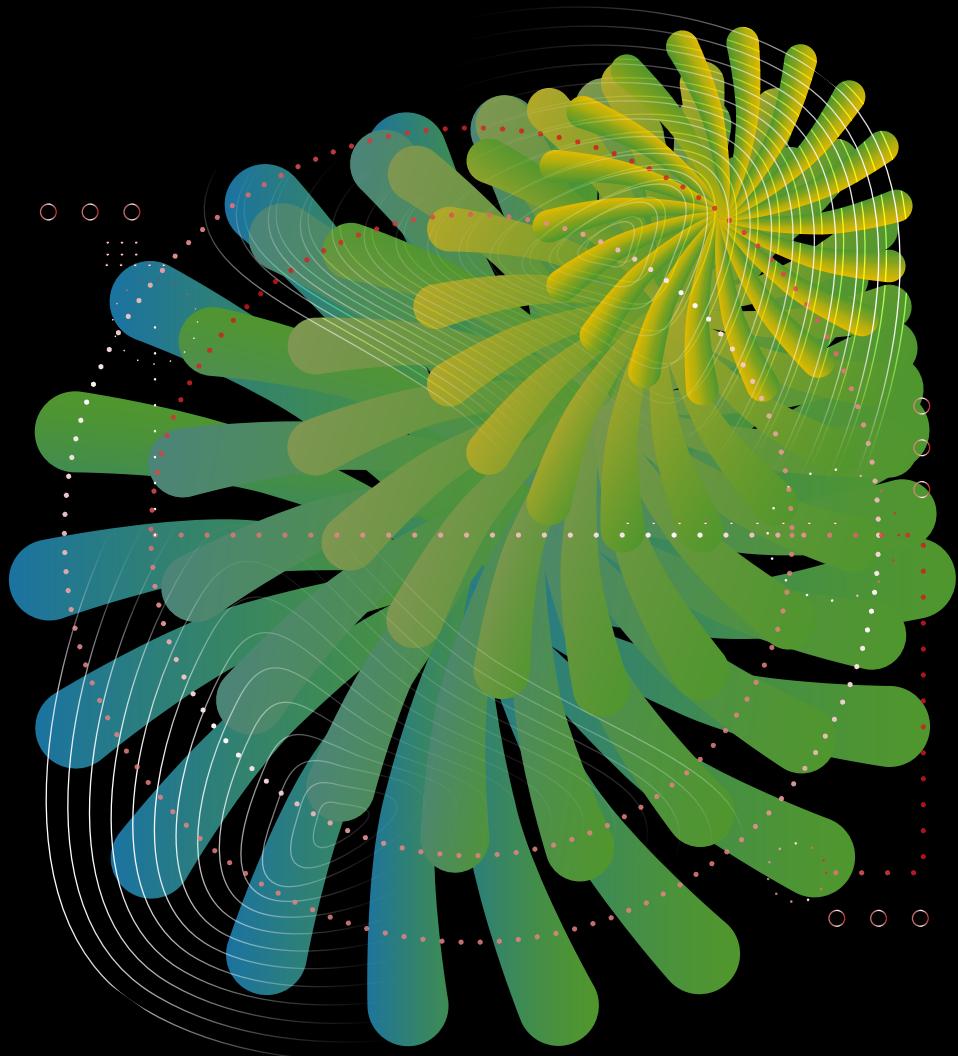


IN

INNOTECH | 30



Revista del Laboratorio
Tecnológico del Uruguay



INNOTEC ISSN 1688-6593 [en línea]
es una revista científica arbitrada editada por el Laboratorio Tecnológico del Uruguay.

EQUIPO EDITORIAL

DIRECCIÓN

Dr. Jorge Silveira

Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), Uruguay

CONSEJO EDITORIAL

Dra. Sofía Barrios

Universidad de la República (UdelaR), Facultad de Ingeniería,
Instituto de Ingeniería Química, Uruguay

MBA. Ing. Mariela De Giuda

Gerente de Tecnología y Gestión, Laboratorio Tecnológico
del Uruguay (LATU), Uruguay

Dr. Andrés Dieste

Universidad de la República (UdelaR), Facultad de
Ingeniería, Instituto de Ingeniería Química, Uruguay

Dr. Gustavo Domínguez

Gerente de Latitud - Fundación LATU, Uruguay

Dra. Gabriela Eguren

Universidad de la República (UdelaR), Facultad de Ciencias,
Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales, Uruguay

PhD. Federico Harte

Profesor adjunto de Food Science, Penn State University,
Estados Unidos

MSc. Rosa Márquez

Latitud - Fundación LATU, Uruguay

Dr. Eduardo Méndez

Universidad de la República (UdelaR), Facultad de Ciencias,
Instituto de Química Biológica, Uruguay

PhD. Laura Moya Silva

Universidad ORT Uruguay, Facultad de Arquitectura, Uruguay

Dr. Daniel Vázquez

INIA La Estanzuela, Plataforma de Agroalimentos, Uruguay

MSc. Daniel Volpe

Gerente de Análisis, Ensayo y Metrología, Laboratorio
Tecnológico del Uruguay (LATU), Uruguay

EDICIÓN

Carla Rizzotto

Edición técnica revista INNOTECH, Centro de Información Técnica,
Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), Uruguay

ADMINISTRACIÓN DE OJS Y GESTIÓN DE INFORMACIÓN

Lic. Lorena Fiori

Centro de Información Técnica. Laboratorio Tecnológico
del Uruguay (LATU), Uruguay

IMPLEMENTACIÓN, HOSTING Y SOPORTE DE OJS

Luis Ramírez Caldas

Bibliolatino

DISEÑO Y ARMADO

Manosanta desarrollo editorial

<https://manosanta.com.uy/>

ACERCA DE INNOTECH

INNOTECH es una publicación arbitrada en modalidad doble ciego por un comité independiente de revisores externos a su entidad editora, el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU).

Editada en Montevideo (Uruguay), bajo la modalidad de publicación continua, contiene artículos originales inéditos y su periodicidad es semestral (enero-junio y julio-diciembre).

El objetivo de la revista es la divulgación y transferencia del conocimiento en las áreas de Forestales, Medio Ambiente, Metrología y Tecnología Alimentaria. INNOTECH está dirigida a académicos, investigadores y técnicos de la comunidad científica uruguaya e internacional.

INNOTECH se encuentra indexada en las siguientes bases de datos: DOAJ, EBSCOhost Academic Premier, Latindex, Redalyc y REDIB.



Somos miembros de:

Asociación Uruguaya de Revistas Académicas AURA



La colección completa se puede consultar en línea en <http://ojs.latu.org.uy/index.php/INNOTECH/index>

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Los conceptos y opiniones vertidas en los artículos aquí publicados, así como el uso que otros puedan hacer de ellos, son de responsabilidad exclusiva de los autores y no reflejan el punto de vista del Laboratorio Tecnológico del Uruguay.

INNOTECH - NÚMERO 30

Julio-diciembre de 2025

ISSN electrónico: 1688-6593

Título clave: INNOTECH (En línea)

Título clave abreviado: Innotec (En línea)

Centro de Información Técnica, LATU

Av. Italia 6201. Tel. (598) 2601 3724,

internos 1314 y 1350

innotec@latu.org.uy

<http://www.latu.org.uy>

<http://ojs.latu.org.uy>

SUMARIO

Artículos

- e686 **Relación entre las mediciones del Diámetro Medio de Fibra mediante Airflow y Laserscan para lana uruguaya**
The relationship between Mean Fibre Diameter measurements by Airflow and Laserscan for uruguayan wool
Karina Andrea Demaría Pérez, Santiago Nicolás Morales Yelpo, Pamela Stefani Ramos Olivera, Patricia Rafaela Zeballos Trinidad
- e687 **Resultados de la primera comparación interlaboratorio en humedad relativa en Panamá: fortalecimiento de la capacidad técnica y aseguramiento de la calidad de las mediciones**
Results of the first interlaboratory comparison of relative humidity in Panama: strengthening technical capacity and assuring the quality of measurements
Fanny Castro, Ebony Prado, Héctor Acevedo, Julio González Vannucchi, Ángel Alfredo Escorche, Diego Romero Velásquez, Erick Domínguez
- e683 **Innovación en el tratamiento de residuos peligrosos en Uruguay: estudio experimental de la combustión latente de tierras contaminadas con hidrocarburos**
Innovation in hazardous waste treatment in Uruguay: experimental study of smouldering combustion of hydrocarbon-contaminated soils
Mirian Elizabeth Casco, Santiago Lassus Gerpe, Martín Torres Brunengo, Andrés Cuña Suárez
- e684 **Aplicación de ultrasonido en cultivos puros de *Microcystis sp.* y muestras de campo del Embalse San Roque (Córdoba, Argentina)**
Application of ultrasound in pure cultures of *Microcystis sp.* and field samples from the San Roque Reservoir (Córdoba, Argentina)
Araceli Ferreyra, Agostina Rigatuso, Camila Mussi, Pedro Mansur, Joaquín Fierro, Román Martino, Jonathan Muchiut, Rubén Vrech, Yadira Ansoar Rodriguez, Florencia Elisabeth Romero, Micaela Juaneda Allende, Guido Marconi, Andrés Rodríguez
- e690 **Relación entre los incendios forestales y la calidad del aire y las precipitaciones en el Área Metropolitana de Asunción, Paraguay**
Relationship between forest fires and air quality and rainfall in the Metropolitan Area of Asunción, Paraguay
Diana Diez-Pérez-Núñez, Ángel Rincón Rodríguez, Analía Soledad Gamarra Rolón, Aura Micaela Miranda Garcete, Betarram Caballero, María Cielo Núñez Ferreira, Clara Cano, Dorina Catalina Frutos Morales, Francisco Arzamendia, Larisa Monserrath Ibarra Amarilla, Larissa Antonella Coronel Rodríguez, Max Alexander Romero Espínola, Melissa Carolina Figueredo Mendoza, Natasha Antonella Barrios Carrera, Sofía del Pilar Chamorro Cardozo, Sofía Belén López López, Luz María T. Escobar Núñez, Cristian M. Argüello Llamas, Marcelo D. López Báez, Tobías M. López-Ramírez, Fátima J. Báez Vázquez, Jorge A. Belotto

POLÍTICA EDITORIAL DEL LATU

La actividad editorial del Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU) tiene como finalidad la difusión en la comunidad académica y profesional uruguaya de las investigaciones que apoyen el desarrollo de tecnologías y modelos de gestión que aporten valor a los procesos de innovación.

Misión

Nuestra misión es la publicación de trabajos originales, con un enfoque de rigor y calidad teórica y metodológica, que contribuyan a la producción sistemática de nuevo conocimiento científico tecnológico y al fortalecimiento de la presencia uruguaya en redes regionales e internacionales.

Es de interés del LATU consolidar el campo de la documentación científica a nivel local mediante la creación e innovación de productos editoriales.

Los objetivos específicos son:

- Promover la publicación de investigaciones de excelencia en las áreas de conocimiento estratégicas del LATU, alineadas a su misión como impulsor del desarrollo sustentable del país y su inserción internacional a través de la innovación.
- Posicionar a los autores, técnicos y colaboradores en las plataformas electrónicas internacionales, estimulando su participación en el marco de un proceso de edición arbitrado por especialistas.
- Contribuir al desarrollo y transferencia de tecnologías de innovación orientadas a la mejora de procesos industriales, empresariales y sociales.
- Aportar y divulgar conocimiento científico de calidad a los técnicos, académicos, investigadores y a la sociedad en su conjunto, tanto para la efectiva transmisión de las experiencias como para el crecimiento profesional.
- Facilitar el intercambio y la creación de nuevo conocimiento entre instituciones.

Invitamos a los autores interesados en publicar en INNOTECH a ingresar a nuestra página en la plataforma Open Journal Systems (<http://ojs.latu.org.uy>) o a contactarse con el Centro de Información Técnica del LATU a través del correo electrónico innotec@latu.org.uy para recibir instrucciones para el envío de artículos a nuestro proyecto editorial.

CÓDIGO ÉTICO DE INNOTECH

La revista INNOTECH adhiere a los principios publicados por COPE (Committee on Publication Ethics) en <https://publicationethics.org/resources/code-conduct> y promueve así la conducta ética de todos los participantes del proceso editorial: autores, revisores y equipo editorial.

Los autores se comprometen a:

- Enviar artículos originales, de su autoría y que no infrinjan derechos de propiedad intelectual y/o derecho de imagen y/o de datos personales de terceros, e inéditos, que no hayan sido presentados simultáneamente a otra publicación.
- Asegurar la veracidad de los datos presentados en su investigación.
- Asegurar la integridad de su investigación, evitando la publicación de resultados parciales.
- Consignar a los autores en base al nivel de responsabilidad intelectual que han tenido en la elaboración del artículo, en orden decreciente, sin que medien otros criterios jerárquicos.
- Designar un autor de correspondencia, que asume la responsabilidad de difundir entre todos los autores los avances y resultados del proceso editorial.
- Identificar debidamente las fuentes originales de los trabajos que cita en su artículo.
- Revisar los antecedentes de otras investigaciones del ámbito teórico inmediato de su trabajo para dar cuenta de la información más actualizada y relevante.
- Reconocer los apoyos académicos, financieros y logísticos que hicieron posible la investigación y/o la elaboración del artículo.

Los revisores se comprometen a:

- Declarar que no existe conflictos de interés para la evaluación de un artículo.
- Realizar su evaluación respondiendo a criterios objetivos y respetando su independencia académica.
- Asegurar la confidencialidad tanto del contenido del artículo como del resultado de su evaluación.
- Preservar el anonimato en todo el proceso, apelando al editor como intermediario de cualquier comunicación con los autores.
- Respetar los tiempos acordados con los editores de la revista para la realización de su trabajo.

El equipo editorial se compromete a:

- Asegurar la honestidad y transparencia de todo el proceso editorial, desde la presentación del artículo, evaluación por pares y publicación en las condiciones pautadas.
- Seleccionar los revisores idóneos para cada trabajo.
- Garantizar la independencia de criterio de los revisores en el ejercicio de su rol.
- Asegurar el anonimato de todas las partes involucradas en el proceso de arbitraje por pares.
- Mediar en posibles conflictos de interés con el apoyo del consejo editorial.
- Velar por el cumplimiento de los plazos acordados en cada fase del proceso.
- Difundir los números publicados en las redes académicas y bases bibliográficas de su entorno local y regional.
- Controlar el cumplimiento de los requisitos por parte de los autores y la actuación acorde de los árbitros.
- Identificar casos de incumplimiento de los compromisos éticos enumerados en este código y penalizar a sus responsables con sanciones que van de la suspensión del infractor en su rol en el proceso editorial a la difusión de una rectificación pública y la remoción del artículo.

INSTRUCCIONES A LOS AUTORES PARA PUBLICAR EN INNOTECH

Ámbito de los artículos y proceso de revisión

INNOTECH publica artículos originales inéditos en español e inglés. Los campos temáticos que aborda responden a las áreas estratégicas de investigación del LATU: Forestales, Medio Ambiente, Metrología y Tecnología Alimentaria.

Esta publicación semestral arbitrada por un comité de revisores externos recopila las investigaciones realizadas en el marco de distintos proyectos y procesos de transferencia de conocimiento para el desarrollo de sistemas innovadores, productivos y de investigación.

Las publicaciones editadas por el Centro de Información Técnica son gestionadas en Open Journal Systems, software para la gestión del proceso editorial, desarrollado, soportado y libremente distribuido por el Public Knowledge Project bajo licencia pública general GNU.

INNOTECH no cobra cargos de ningún tipo por el envío de originales ni por su procesamiento.

El tiempo estimado para los procesos de evaluación y publicación es de 18 semanas.

El proceso de envío de artículos para la revista incluye los siguientes pasos:

- (a) Ingreso por parte del autor del artículo completo en el sistema utilizado por el Centro de Información Técnica para la edición de sus publicaciones en la web: <http://ojs.latu.org.uy>.
- (b) Por medio del sistema se notifica al autor la recepción del artículo y su eventual publicación. En este paso se considera la originalidad del trabajo y se priorizan aquellos de áreas estratégicas y temáticas nacionales.
- (c) Una vez aprobado por el Consejo editorial de la revista, el artículo es enviado a proceso de arbitraje.
- (d) Se asignan los árbitros, independientes y externos, quienes evaluarán el desarrollo específico del manuscrito, tanto en sus aspectos temáticos como metodológicos.
- (e) Devuelto el informe de arbitraje, el editor se comunica con el/los autor/es en respuesta de los comentarios que hace el evaluador del artículo. En caso de ser necesario habrá otras rondas de evaluación.
- (f) Se edita el artículo aplicando en el texto las normas del Manual de estilo del LATU y se envía la última versión diseñada al/los autor/es para su aprobación final.

Para poder incluir artículos completos, se debe considerar que estos no tengan derechos de autor otorgados a terceros a la fecha de envío y que no se hayan presentado a otras publicaciones simultáneamente. Los artículos son publicados en OJS y se distribuyen bajo la modalidad de acceso abierto. Los derechos autorales son protegidos por Creative Commons (CC) Atribución-NoComercial 4.0 Unported. Al ingresar al sistema <https://ojs.latu.org.uy/inicio/> los autores deberán aceptar la nota de copyright en la que se asumen los términos de responsabilidad, se reconoce la licencia CC y se establece el compromiso a realizar la cita completa de la edición institucional de esta primera publicación del artículo en sus siguientes publicaciones -completas o parciales- efectuadas en cualquier otro medio de divulgación, impreso o electrónico. Los autores están autorizados a realizar una publicación simultánea en sistemas de autoarchivo o repositorios institucionales.

Los conceptos y opiniones vertidos en los artículos publicados y el uso que otros puedan hacer de ellos son de responsabilidad de sus autores. Esta responsabilidad se asume con la sola publicación del artículo enviado. El LATU se reserva el derecho de publicar aquellos artículos que responden a las áreas estratégicas fijadas por la organización para cada edición y de realizar modificaciones que considere favorables a la óptima presentación de los contenidos en la revista.

PROCESO DE REVISIÓN

El arbitraje de esta revista se realiza por pares y bajo modalidad doble ciego, por lo que autores y árbitros permanecen anónimos a lo largo de todo el proceso. El arbitraje es el proceso de evaluación crítica especializada de un manuscrito por parte de pares idóneos que operan en el área temática que dicho texto desarrolla. Cada artículo es revisado por un mínimo de dos árbitros. Los comentarios y recomendaciones de los evaluadores son un insumo determinante para la aceptación o rechazo de un manuscrito en el proceso editorial de publicaciones técnicas del LATU; no obstante, el equipo editor es responsable de la decisión final de publicación o rechazo de un artículo y de la notificación al autor de contacto.

El comité técnico de arbitraje de INNOTECH es un cuerpo de especialistas técnicos seleccionados por su grado de especialización, prestigio académico y experiencia profesional y editorial. Nuestros árbitros cumplen la vital función de evaluar el desarrollo específico del contenido de las publicaciones, tanto en sus aspectos temáticos como metodológicos, guiados por un formulario de revisión que una vez completo es presentado a los autores del artículo. Los autores cuentan con un plazo de siete días para la devolución del artículo corregido según las recomendaciones de los árbitros.

NORMAS DE PRESENTACIÓN Y ENVÍO DE LOS TEXTOS

Para que el artículo sea considerado para su publicación, debe cumplir con las siguientes normas de presentación. Ante cualquier consulta diríjase al correo electrónico de referencia innotec@latu.org.uy. Para el correcto envío de su artículo, siga las instrucciones que se indican en OJS. Recuerde completar todos los datos del artículo, entre ellos: título, autores, filiación, resumen y palabras clave. Nota: Los nombres completos de los autores deberán ser incluidos en los metadatos en la forma en la que se solicitan en OJS, pero omitidos en el documento Word del artículo, primera medida para asegurar la integridad de la revisión ciega.

DEFINICIONES:

Autor. Persona o colectividad responsable del contenido intelectual del documento.

Título. Refleja el contenido del texto con precisión, es neutro e informativo.

Resumen. Provee información específica. Sintetiza, anuncia y jerarquiza contenidos.

Introducción. Incluye antecedentes concretos y datos del proceso, enumeración de objetivos e importancia del tema.

Materiales y métodos. Relato de los métodos y procedimientos que permitieron obtener los resultados presentados. Obtención del material, condiciones y metodología. Análisis estadísticos, programas.

Resultados. Presentación y expresión de los hallazgos en tablas, gráficos y/o figuras.

Discusión y conclusiones. Síntesis de los avances y las contribuciones más relevantes de la investigación.

En esta sección se discuten los resultados en el orden en el que fueron presentados. Asimismo, se define y diferencia claramente el aporte del trabajo con respecto al conocimiento previo. Si procede, se mencionan posibles líneas futuras de investigación y de aplicación de los resultados.

Agradecimientos. Breve agradecimiento a quienes colaboraron en la producción del artículo y/o que permitieron el desarrollo de la investigación.

Referencias. Referencias al material bibliográfico consultado para la elaboración del artículo.

LOS ARTÍCULOS DEBEN PRESENTAR:

Título del artículo en mayúsculas y minúsculas, en inglés, español y portugués.

Nombre completo de todos los autores (solo en metadatos de OJS), ingresados en orden decreciente según el grado de responsabilidad en el desarrollo del artículo, sin que medien jerarquías funcionales. Indicar la sección o departamento al que pertenecen y empresa de la que forman parte. Se debe señalar además el autor de contacto para las comunicaciones electrónicas subsiguientes. Los autores deberán contar con un número de registro en ORCID, que se consigna en OJS al ingresar los autores en metadatos. Para más información sobre ORCID y su relevancia para los autores puede consultar esta página: <https://orcid.org/>.

Resumen en inglés, español y portugués, de 200 palabras máximo en su versión castellana.

Palabras clave, en inglés, español y portugués, de dos a cinco, las cuales no deben repetir los términos ya utilizados en el título.

Texto de tres (3) a veinticinco (25) páginas de desarrollo (introducción, métodos, descripción de equipos, descripción de programas, desarrollo de teorías, resultados y discusión, conclusiones, referencias, tablas, figuras e imágenes, ver sección Estilo y formato de citas y referencias en este documento). El texto deberá ser presentado en fuente Arial 11, a espacio doble y con numeración de líneas, con títulos en mayúsculas y minúsculas y en formato.doc, de cualquier versión de Microsoft Word. Evitar las notas al pie en el desarrollo del artículo. Las denominaciones en latín deben ir en cursiva.

Secciones. Los títulos de sección (que señalan Introducción, Materiales y Métodos, Discusión, etc.) deben ser escritos en mayúscula y minúsculas, estilo de fuente bold y centrados en el texto. Los subtítulos serán justificados a la izquierda, escritos en mayúscula y minúsculas, también en bold. Tanto la primera letra del título y la primera letra de los nombres propios deben ser escritas en mayúscula. Se debe dejar un espacio entre líneas antes y después de cada subtítulo.

Fórmulas, figuras, tablas e imágenes. Las figuras deben numerarse correlativamente en orden de aparición en el texto, y deben incluir un breve título explicativo en el margen inferior a las mismas. Si es necesario incluir fotos o imágenes, éstas se deben designar como figuras. Las fotos deben ser nítidas y enviadas en formato jpg (mínimo 300 px aseguran una buena calidad de impresión). Las tablas deben ser numeradas correlativamente y en forma independiente de las figuras, y cada entrada debe ocupar su propia

celda. Se deben numerar según el orden de aparición en el texto, incluyendo un título explicativo en la parte superior de la tabla. Evitar utilizar líneas verticales y en la medida de lo posible no incluir más de dos tablas por carilla, no dividir tablas en más de un folio o en forma perpendicular al texto. El texto presenta las tablas, no desarrolla su contenido, éstas deben explicarse en sí mismas. Además de estar insertadas en el artículo, cada figura y tabla debe ser remitida en su propio archivo como fichero complementario en OJS, con la referencia numérica correspondiente. Los números y símbolos empleados no deben ser menores al tamaño usado en el resto del texto (Arial 11).

ESTILO DE CITAS Y REFERENCIAS SEGÚN EL SISTEMA HARVARD

Si el texto está en inglés utilizar «and» en lugar de «y», «In:» en lugar de «En:», «[Accessed: day month year]» en lugar de «[Consulta: día mes año]» y «Available at:» en lugar de «Disponible en:»

Ejemplos usuales de citas

Registro de citas textuales

(López, 1985, p. 93)

(González y Rubio, 1990, pp. 110-111)

(Johnson et al., 1970, pp. 25-26)

Para más de una obra del mismo autor y año en citas textuales

(Alonso, 1988a, p. 126-128)

(Alonso, 1988b, p. 84)

Registro de cita ideológica o paráfrasis

Amor (2000) analiza los motivos para comenzar un negocio en línea...

Si el motivo para comenzar un negocio en línea es sólo para imitar a la competencia, se puede considerar que dicha razón no es la estrategia adecuada (Amor, 2000).

(Pérez y González, 2005)

(Rodríguez et al., 2011).

(Pérez, 2014a)

(Pérez, 2014b)

Ejemplos usuales de referencias monografías (libros)

Apellidos(s), Nombre o Inicial, año de edición. *Título del libro en cursiva*. N° de edición. Lugar de edición: editorial. (Serie; N°). ISBN (este último si se posee) DOI (siempre que el libro lo posea)

Bobbio, Norberto, 1958. *Autobiografía*. Madrid: Taurus. ISBN: 84-306-0267-4.

Newman, R. y Walter, C., 2008. *Barley for food and health: science, technology, and products*. Nueva York: John Wiley & Sons.

Revistas como un todo

Título de la publicación en cursiva. Responsabilidad. Edición. Identificación del fascículo. Lugar de edición: editorial, fecha del primer volumen-fecha del último volumen. ISSN

Boletín Económico. Banco de España. 1998, (1). Madrid: Banco de España, Servicio de Publicaciones, 1979.
ISSN: 0210-3737

Artículos de revistas

Apellido(s), Nombre o Inicial, año. Título del artículo. En: *Título de la publicación seriada*, Volumen (Número), páginas. DOI (siempre que el artículo lo posea).

Llosa, J.; Smith, M.; Moore, A. y Cave, K., 1998. Modulo scheduling with reduced register pressure. En: *IEEE Transactions on computers*, 47(6), pp. 625-638. DOI: 10.1109/12.689643

Álvarez, Begoña; Ballina, F. Javier de la y Vázquez, Rodolfo, 2000. La reacción del consumidor ante las promociones. En: *MK Marketing + Ventas*, (143), pp. 33-37.

Normas

Entidad responsable de la norma (País de la entidad), año de publicación. *No. o código de la norma: Título*. Lugar de publicación: editorial abreviada.

Asociación Española de Normalización y Certificación (España), 2010. *UNE 166000 EX, UNE 166001 EX, UNE 166002 EX: Gestión de la I+D+I*. Madrid: AENOR.

Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (Uruguay), 2000. *UNIT-ISO 9001: Sistemas de gestión de calidad - requisitos*. Montevideo: UNIT.

Textos electrónicos, bases de datos y programas informáticos

Responsabilidad principal, año. *Título* [tipo de soporte]. Edición. Lugar de publicación: editor, [fecha de consulta]. Descripción física. (Colección). Notas. Disponibilidad y acceso. Número normalizado. DOI (siempre que el material lo posea)

Rapp, A. O.; Augusta, U. y Peek, R. D., 2001. *Facts and ideas of testing wood durability above ground* [En línea]. Hamburgo: BFH. [Consulta: 25 de setiembre de 2008]. Disponible en: <http://www.bfah.de/inst4/43/pdf/3doublay.pdf>

Patentes

Mención de responsabilidad principal, Año de publicación del documento. *Denominación del elemento patentado*. Identificador del documento (país u oficina que lo registra). Clase internacional de documento de patente. Número.

Green, Daniel R., 2008. *Cereal flake with topical pieces*. United State Patent. 0101. D572,427.

Crosa, M. J.; Harispe, R.; Repiso, L.; Silvera, C. y Wurtz, P., 2009. *Sistema que acelera el ingreso de solutos en alimentos porosos*. Uruguay. Dirección Nacional de la Propiedad Industrial. 31620.

Relación entre las mediciones del Diámetro Medio de Fibra mediante Airflow y Laserscan para lana uruguaya

The relationship between Mean Fibre Diameter measurements by Airflow and Laserscan for uruguayan wool

Relação entre as medições do Diâmetro Médio da Fibra por Airflow e Laserscan para lã uruguaia

 KARINA ANDREA DEMARÍA PÉREZ (1)

 SANTIAGO NICOLÁS MORALES YELPO (1)

 PAMELA STEFANI RAMOS OLIVERA (1)

 PATRICIA RAFAELA ZEBALLOS TRINIDAD (1)

(1) Departamento de Textiles, Lana Bruta, Tops y Cueros, Laboratorio Tecnológico del Uruguay, LATU, Montevideo, Uruguay.

RECIBIDO: 17/7/2025 → APROBADO: 14/10/2025  paramos@latu.org.uy

RESUMEN

Uruguay es reconocido por su producción de lana de alta calidad, combinando prácticas tradicionales con tecnología moderna. Aunque la producción de lana cayó un 3,5 % el año pasado, las exportaciones aumentaron un 62,7 %. Sin embargo, su competitividad estaba limitada por una regulación de la International Wool Textile Organisation (IWTO) que exigía la certificación del Diámetro Medio de Fibra (DMF) con el método Airflow (AF, IWTO-28) (International Wool Textile Organisation, 2013), a pesar de que los mercados líderes utilizan el Laserscan (LSN, IWTO-12) (International Wool Textile Organisation, 2012). Este estudio analizó 161 muestras de lotes comerciales de lana uruguaya (finuras de 16 µm a 33 µm) para evaluar la equivalencia entre AF y LSN. Se encontró una elevada correlación estadística, ausencia de sesgo sistemático e independencia del nivel al aplicar el protocolo IWTO-0 (International Wool Textile Organization, 2020). Esto confirma que la matriz de lana uruguaya es compatible con ambos métodos, permitiendo su intercambiabilidad dentro de los límites de incertidumbre. La evidencia obtenida respaldó la modificación de las regulaciones de la IWTO. En el Congreso de Lille en 2025, se aprobó la enmienda que exime a la lana uruguaya de la medición complementaria por AF. Esta decisión permite al país certificar el DMF exclusivamente mediante LSN, lo que optimiza costos y alinea sus estándares con los mercados globales, potenciando la comercialización de la lana a nivel mundial.

Palabras clave: evaluación tecnológica, certificación, IWTO, calidad.

ABSTRACT

Uruguay is recognized for its production of high-quality wool, combining traditional practices with modern technology. Although wool production fell by 3.5 % last year, exports increased by 62.7 %. However, its competitiveness was limited by an International Wool Textile Organisation (IWTO) regulation that required the certification of Mean Fibre Diameter (MFD) using the Airflow method (AF, IWTO-28) (International Wool Textile Organisation, 2013), despite the fact that leading markets utilize the Laserscan (LSN, IWTO-12) (International Wool Textile Organisation, 2012). This study analysed 161 samples of commercial lots of Uruguayan wool (fineness ranging from 16 µm to 33 µm) to evaluate the equivalence between AF and LSN. A high statistical correlation was found, along with a lack of systematic and level-dependent bias when applying the IWTO-0 protocol (International Wool Textile Organization, 2020). This confirms that the Uruguayan wool matrix is compatible with both methods, allowing for their interchangeability within the limits of uncertainty. The evidence obtained supported a modification of the IWTO regulations. At the Lille Congress in 2025, an amendment was approved that exempts Uruguayan wool from the complementary AF measurement. This decision allows the country to certify MFD exclusively using LSN, which optimizes costs and aligns its standards with global markets, boosting the worldwide commercialization of wool.

Keywords: technological assessment, certification, IWTO, quality.

RESUMO

O Uruguai é reconhecido pela sua produção de lã de alta qualidade, combinando práticas tradicionais com tecnologia moderna. Embora a produção de lã tenha caído 3,5 % no ano passado, as exportações aumentaram 62,7 %. No entanto, sua competitividade era limitada por uma regulamentação da International Wool Textile Organisation (IWTO) que exigia a certificação do Diâmetro Médio da Fibra (DMF) pelo método Airflow (AF, IWTO-28) (International Wool Textile Organisation, 2013), apesar de os mercados líderes utilizarem o Laserscan (LSN, IWTO-12) (International Wool Textile Organisation, 2012). Este estudo analisou 161 amostras de lotes comerciais de lã uruguaya (com finuras de 16 µm a 33 µm) para avaliar a equivalência entre AF e LSN. Foi encontrada uma elevada correlação estatística e ausência de viés sistemático e dependente do nível ao aplicar o protocolo IWTO-0 (International Wool Textile Organization, 2020). Isso confirma que a matriz de lã uruguaya é compatível com ambos os métodos, permitindo sua intercambialidade dentro dos limites de incerteza. A evidência obtida apoiou a modificação das regulamentações da IWTO. No Congresso de Lille em 2025, foi aprovada a emenda que isenta a lã uruguaya da medição complementar por AF. Esta decisão permite ao país certificar o DMF exclusivamente através do LSN, o que otimiza custos e alinha seus padrões com os mercados globais, potenciando a comercialização da lã a nível mundial.

Palavras-chave: avaliação tecnológica, certificação, IWTO, qualidade.



INTRODUCCIÓN

Uruguay y su producción lanera

Uruguay ha sido reconocido históricamente por la solidez de su sector agropecuario, con la producción de lana como un pilar fundamental de su economía rural. Esta aseveración se sustenta en la información estadística del Secretariado Uruguayo de la Lana (SUL) y en análisis técnicos del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP), a través de su Oficina de Planeamiento y Políticas Agropecuarias (OPYPA) (Abella y Piegas, 2024; Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, 2023; Piegas, 2024; Secretariado Uruguayo de la Lana, s.d.). Adicionalmente, esta agroindustria genera un impacto socioeconómico significativo en la macroeconomía nacional.

Las características agroecológicas singulares del país, que incluyen la extensión de sus pastizales naturales y un clima templado, constituyen un ambiente óptimo para el desarrollo de la ovinocultura, una práctica intrínseca a las tradiciones productivas (Abella y Piegas, 2024; Piegas, 2024; Secretariado Uruguayo de la Lana, s.d.).

El sector lanero uruguayo se caracteriza por la alta calidad de su producción, destacándose particularmente la lana Merino fina, la cual posee una elevada demanda en los mercados internacionales (Secretariado Uruguayo de la Lana, s.d.). A pesar de enfrentar desafíos estructurales como la volatilidad de los precios globales y las adversidades climáticas (sequías o eventos extremos), la agroindustria ha exhibido una notable resiliencia y capacidad de adaptación. Las tendencias recientes señalan una transición progresiva hacia la implementación de prácticas de producción sostenibles y éticas, lo que converge con las exigencias globales por productos ambientalmente amigables y socialmente responsables (Secretariado Uruguayo de la Lana, s.d.).

Estadísticas y contexto de la producción lanera uruguaya

La producción de lana en Uruguay ha manifestado fluctuaciones interanuales, reflejando las dinámicas del mercado global y doméstico (Abella y Piegas, 2024; Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, 2023; Piegas, 2024; Secretariado Uruguayo de la Lana, s.d.).

Actualmente, el stock ovino nacional asciende a 5,3 millones de cabezas, con una producción anual estimada de aproximadamente 24.000 toneladas de lana (Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, 2023). En el ejercicio 2023/2024, el país exportó 44,2 millones de kilogramos de lana, lo que supuso un incremento significativo del 62,7 % respecto a períodos precedentes (Abella y Piegas, 2024).

China se posiciona como el principal destino de la lana uruguaya, seguido por Alemania, Italia y otros países de la Unión Europea. La calidad, la sustentabilidad y la capacidad de adaptación a las condiciones del mercado son factores clave en el éxito de la industria (Abella y Piegas, 2024; Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, 2023; Piegas, 2024).

La mayor proporción de la producción uruguaya corresponde a lanas de micras medias (*mid-micron wool*), aunque se registra un interés creciente en las lanas Merino finas y superfinas (Secretariado Uruguayo de la Lana, s.d.).



El Secretariado Uruguayo de la Lana (SUL) identifica las siguientes razas ovinas predominantes en la producción nacional: Corriedale (lana de micras medias), Merino (lana fina y superfina), Ideal (lana medio-fina), Merilin (lana y carne, considerada doble propósito) y Romney Marsh (lana gruesa).

Estas razas exhiben una distribución geográfica diferenciada en el territorio, abarcando áreas como la basáltica Norte, las sierras del Este y las llanuras centrales, cuyas características edafoclimáticas específicas influyen en la calidad intrínseca de la fibra producida (Secretariado Uruguayo de la Lana, s.d.).

Certificación, comercialización y metrología de la lana uruguaya

El Secretariado Uruguayo de la Lana (SUL) juega un rol instrumental en la promoción de la ovinocultura sostenible y en el mejoramiento de la calidad de la fibra a través de programas de desarrollo. La lana uruguaya se destina predominantemente a la exportación hacia mercados como Europa, Asia y América del Norte, comercializándose en múltiples fases de procesamiento, incluyendo lana sucia (greasy wool), lana lavada (scoured wool) y tops de lana peinada (combed wool tops) (Abella y Piegas, 2024; Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, 2023; Secretariado Uruguayo de la Lana, s.d.). La certificación es crucial, ya que garantiza que los compradores seleccionan fibras que satisfagan sus requisitos técnicos, facilitando transacciones y potenciando el valor de la lana.

El proceso de certificación implica pruebas rigurosas ejecutadas conforme a las regulaciones de la IWTO. El Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU) muestrea y analiza los lotes, certificando parámetros críticos como la base de lana (wool base), el diámetro de la fibra (DMF), la base de materia vegetal y el color, entre otros. Estos parámetros son esenciales para sostener la reputación de la lana en los mercados globales (International Wool Textile Organisation (IWTO), 2006, 2020, 2023; Sommerville, 2007). Sin embargo, un desafío regulatorio persiste: las normas actuales de la IWTO exigen que cualquier ensayo de DMF realizado mediante Laserscan (LSN) en lana uruguaya debe ser acompañado por una medición certificada obtenida por Airflow (AF). Esta duplicación genera sobrecostos y potenciales distorsiones en la comercialización, especialmente porque los principales exportadores utilizan el LSN como método predeterminado (Dawes et al., 2018; Heath et al., 2006).

Los desafíos metrológicos se centran en obtener mediciones objetivas, precisas y representativas de las propiedades de la fibra. El DMF es la característica más importante, controlando hasta el 80 % del valor de la lana y su hilabilidad (International Wool Textile Organization, 2020), lo que convierte la elección instrumental en un problema central. Adicionalmente, la heterogeneidad intrínseca de la fibra es un factor clave: la variabilidad en el diámetro (CV) es crucial, ya que una mayor dispersión afecta negativamente el rendimiento del hilado. Finalmente, la metrología debe asegurar la cuantificación precisa del rendimiento y la estandarización rigurosa de los protocolos de muestreo y ensayo para garantizar la confiabilidad e intercambiabilidad global de los resultados.

En consecuencia, el sector lanero uruguayo busca eliminar el requisito de medición complementaria por AF para negociar su producto bajo la misma base técnica que sus competidores (Baxter, 1998). Aunque el AF y el LSN están altamente correlacionados, las diferencias físicas inherentes en la determinación del DMF (indirecta o directa) pueden

generar sesgos dependientes del nivel específico de la matriz de la lana uruguaya (Dawes et al., 2018). El presente informe examina precisamente la relación metrológica entre las mediciones de DMF obtenidas por AF y LSN a través de una muestra representativa, buscando demostrar la analogía de la matriz uruguaya con la de los principales competidores y evaluar las implicaciones comerciales de una eventual transición al uso exclusivo del LSN (Baxter, 1998; Heath et al., 2006).

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo y diseño experimental

Se seleccionaron 161 lotes comerciales de lana sucia (greasy wool) ensayados durante la zafra 2024-2025, siendo procesados en el año 2024 aproximadamente 2600 lotes. Este tamaño muestral se determinó con base en la consistencia estadística y la comparabilidad internacional, tomando como referencia estudios metrológicos previos en países productores de lana fina (Dawes et al., 2018; Heath et al., 2006).

El diseño de muestreo fue intencional y estratificado, asegurando la representatividad de la lana uruguaya al abarcar el rango típico de razas, tipologías de fibra (vellón y no-vellón), y la distribución de finuras procesadas a nivel nacional, a través de la producción proveniente del procesamiento en fábrica. Este procedimiento garantizó que la muestra cubriera un amplio espectro de DMF (desde 16,5 µm hasta 33,1 µm). La toma de muestra inicial se realizó en las fábricas por inspectores del LATU capacitados bajo las normas de la IWTO. Posteriormente, la muestra total fue enviada al LATU para la preparación de las submuestras.

Determinación del Diámetro Medio de Fibra

La determinación del DMF se llevó a cabo utilizando dos metodologías en paralelo: Airflow (AF) y Laserscan (LSN). El método AF (IWTO-28) (International Wool Textile Organisation, 2013) se fundamenta en el principio físico de la permeabilidad al aire de una muestra compactada, infiriendo la finura a partir de la resistencia aerodinámica que ofrece la lana. El resultado es una estimación indirecta de la superficie total de las fibras. Las muestras para AF fueron sometidas a un proceso de cardado utilizando Analizadores Shirley para asegurar la desalineación uniforme, esencial para la técnica de porosidad.

El método LSN (IWTO-12) (International Wool Textile Organisation, 2012) emplea óptica y electrónica para obtener una medida directa y objetiva mediante difracción láser. Mide el diámetro real de miles de segmentos de fibra (snippets) a gran velocidad, proporcionando no solo el DMF sino también el Coeficiente de Variación (CV). Las muestras para LSN se obtuvieron por minicoreo (minicoring) de material lavado y secado (scoured/dried). Los equipos utilizados para el ensayo AF se ilustran en la Figura 1A, mientras que los equipos para el ensayo LSN se ilustran en la Figura 1B.



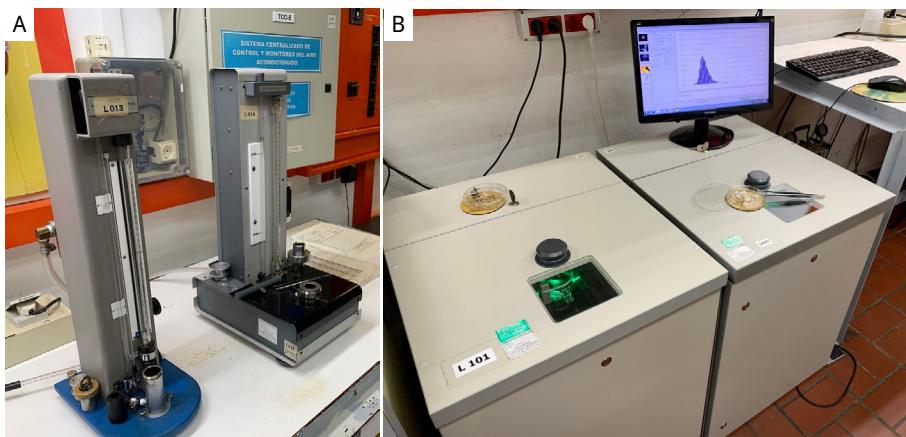


FIGURA 1. A) Equipos Airflow y B) Equipos Laserscan.

Metodología de ensayo, acondicionamiento y calibración

Previo a la medición, todas las submuestras fueron acondicionadas en una atmósfera estándar (típicamente $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y $65 \pm 3\%$ de humedad relativa) conforme al estándar IWTO-52 (International Wool Textile Organization, 2006) para neutralizar el efecto de la humedad ambiental. La determinación del DMF se realizó tomando un mínimo de cuatro lecturas por lote distribuidas entre dos instrumentos AF, y analizando cuatro especímenes por lote (cada uno compuesto por 1000 segmentos de fibra) distribuidos entre dos instrumentos LSN.

Para asegurar la trazabilidad metrológica y la confiabilidad de los datos, todos los equipos AF y LSN fueron calibrados antes de la medición conforme a sus respectivos Métodos de Ensayo IWTO, empleando la serie IH de Interwoollabs como Material de Referencia certificado.

Análisis estadístico (metodología IWTO-0)

El análisis de los datos se llevó a cabo conforme a los procedimientos estadísticos establecidos en el Apéndice B de la norma IWTO-0 (International Wool Textile Organisation, 2020). Esta metodología proporciona el marco para la comparación de mediciones de finura y tiene como propósito principal cuantificar la existencia y magnitud de cualquier sesgo (bias) entre el método de referencia (AF) y el método a comparar (LSN). Específicamente, el análisis incluyó la evaluación de la diferencia media para determinar el sesgo sistemático promedio y el cálculo del sesgo dependiente del nivel, que se obtiene mediante la regresión de la diferencia contra el promedio de los dos resultados, indicando si la discrepancia varía en función del DMF.

RESULTADOS

Comparación de las mediciones Airflow y Laserscan: análisis IWTO-0

Los datos obtenidos de las mediciones de DMF por los métodos AF y LSN fueron sometidos a un análisis estadístico en conformidad con el Apéndice B de la normativa IWTO-0 (International Wool Textile Organisation, 2020).

Estos procedimientos son cruciales, ya que la aceptación comercial del LSN como método de certificación primario para la lana uruguaya depende de la demostración de que la matriz local presenta una correlación y un sesgo consistentes con los patrones de lanas ya aceptadas globalmente.

El coeficiente de correlación obtenido, cuyo valor es altamente significativo (próximo a la unidad, $r = 0,99$), es un indicio de la fuerte relación lineal positiva que existe entre las metodologías AF y LSN. Esto implica que las variaciones en el DMF son proporcionales y exhiben una concordancia direccional entre ambos instrumentos de ensayo.

Asimismo, no se identificó un sesgo (bias) general significativo entre los resultados arrojados por los métodos AF y LSN. Esta ausencia de sesgo estadístico sugiere que ambas técnicas producen mediciones de DMF promedio que son equivalentes (Tabla 1).

TABLA 1. Sesgo relativo global y Prueba t de Student Pareada.

Parámetro estadístico	Sesgo general		Prueba t Pareada
	AF	LSN	
N	161	161	161
Promedio	23,91	23,92	0,01
Desvío estándar	4,27	4,24	0,30
Error estándar	0,34	0,33	0,02
Valor t			0,42
Valor p			0,67
Significancia			NS

Los datos obtenidos fueron representados gráficamente en las Figuras 2 y 3, donde se visualiza la diferencia absoluta o relativa entre las mediciones LSN y AF a lo largo de diámetros de fibra analizados. Estas representaciones ilustran la consistencia entre las dos metodologías de ensayo.

En la Figura 2, que representa el análisis Diferencias Versus Promedios (DVP), se visualizan los resultados de la concordancia entre ambos métodos. Las dos líneas ubicadas simétricamente a cada lado de la ordenada 0 representan los Límites de Confianza del 95 % para los datos. La línea discontinua central es la regresión de Mínimos

Cuadrados Ordinarios (OLS) aplicada a la diferencia contra el promedio, cuya pendiente es clave para detectar la existencia de un sesgo dependiente del nivel.

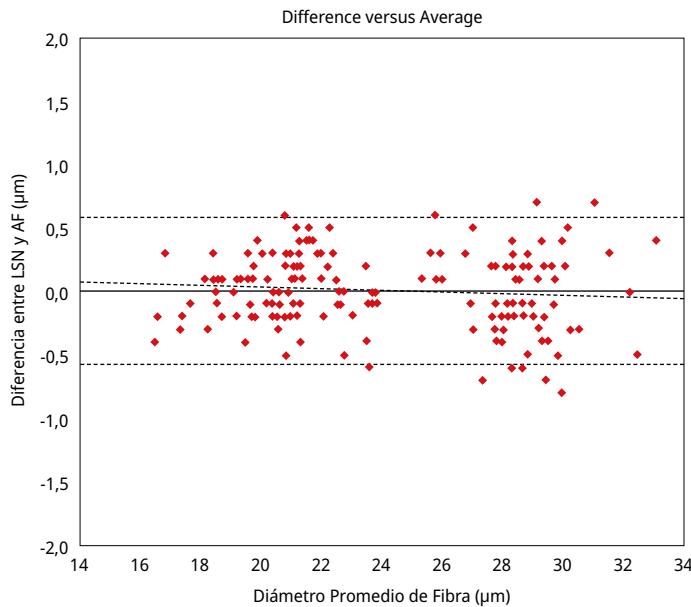


FIGURA 2. Diferencias en el Diámetro Medio de Fibra entre AF y LSN.

La Figura 3 ilustra la relación de concordancia entre los dos instrumentos. En ella se observa la correlación directa entre los resultados obtenidos por el LSN y el AF, donde la línea de identidad 1:1 y el modelo de Regresión de Mínimos Cuadrados Geométricos (GM) se superponen de manera virtualmente indistinguible, confirmando gráficamente la cercanía de la relación funcional.

Se observa una concordancia entre la línea de GM, que modela la relación empírica observada. La similitud en el comportamiento es un indicador de la alta correlación y la mínima dispersión entre las mediciones producidas por ambos métodos. Este hecho se confirma por el elevado coeficiente de determinación (R^2) obtenido del análisis de regresión, cuyo valor fue de 0,99.

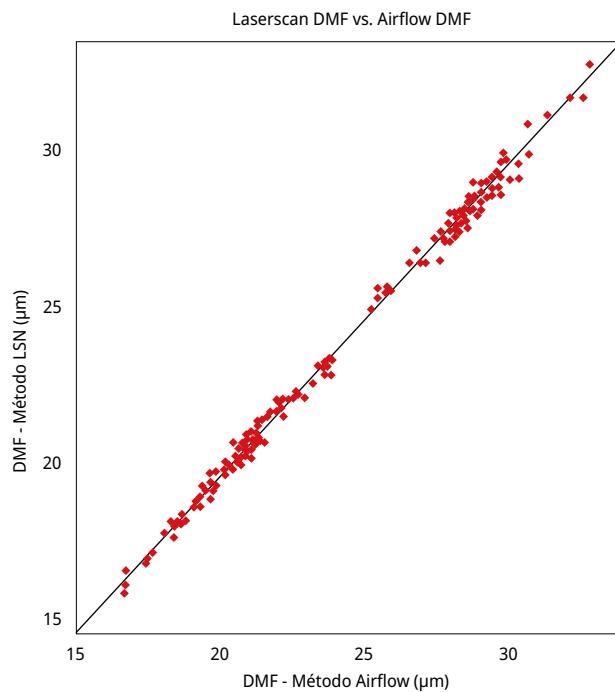


FIGURA 3. Relación entre las mediciones del Diámetro de Fibra por AF y LSN.

Las diferencias puntuales entre las mediciones generalmente se ubican dentro de un rango, reforzando la hipótesis de la intercambiabilidad entre AF y LSN para la certificación del DMF en la lana uruguaya. La coherencia visual de los datos es la confirmación gráfica de que el sesgo es constante y no dependiente del nivel.

El análisis de regresión, ejecutado conforme a la metodología del Apéndice B de la norma IWTO-0 (International Wool Textile Organisation, 2020), fue aplicado para determinar la existencia de un sesgo significativo dependiente del nivel entre los métodos AF y LSN (Tabla 2).

El análisis comparativo de instrumentos de medición de lana AF y LSN es bivariado, porque ambas variables (las mediciones de cada instrumento) incluyen un componente de varianza significativa debido a errores de muestreo y de medición. Utilizar el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS) resulta en una subestimación sistemática de la relación real entre los instrumentos (sesgo de atenuación). Por esta razón, se emplea el Modelo de Regresión de Errores en Ambas Variables (GM) (Buonaccorsi, 1996). Este modelo corrige el sesgo inherente al OLS, proporcionando una estimación más precisa de la relación funcional entre los instrumentos, esencial para validar la intercambiabilidad de los métodos de certificación.

El protocolo de la International Wool Textile Organisation (IWTO) para la comparación de métodos exige la evaluación a través de dos modelos de regresión complementarios para asegurar la solidez del análisis. El primer modelo es la Regresión de Mínimos Cuadrados Geométricos (GM), el cual compara directamente el DMF obtenido por LSN contra el DMF de AF. Un coeficiente de pendiente ideal de 1 indicaría una relación perfecta de 1:1 sin sesgo dependiente del nivel. En este estudio, la pendiente obtenida fue de 0,99, un valor próximo a la unidad, lo que sugiere una equivalencia lineal cercana.

Además del uso de la Regresión GM para estimar la relación funcional real, la comparación de instrumentos requiere la aplicación del método de Diferencias Versus Promedios (DVP), conocido como el gráfico de Bland-Altman. Este segundo modelo, sugerido inicialmente para la comparación de métodos en medicina que implican modelos bivariados con varianza significativa (Altman y Bland, 1983), sirve como el estándar para la detección del sesgo dependiente del nivel, evaluando directamente el acuerdo o concordancia.

En el análisis DVP, la regresión se realiza utilizando la diferencia entre los dos métodos en función del promedio de sus resultados. La gráfica DVP, al trazar la diferencia de las mediciones contra su promedio, permite identificar el sesgo sistemático y si la diferencia entre los métodos varía proporcionalmente a la finura de la fibra. Una pendiente ideal de 0 en este modelo indicaría que el sesgo es completamente constante a lo largo de todo el espectro de finuras, es decir, que la diferencia entre LSN y AF no varía sistemáticamente con el DMF. El objetivo es que las diferencias se mantengan dentro de los Límites de Confianza del 95 % para considerar los métodos como intercambiables funcionalmente.

El análisis reveló que las pendientes de los modelos no son estadísticamente significativas ($p > 0,05$), lo que demuestra de manera concluyente que no existe un sesgo dependiente del nivel significativo entre las mediciones de DMF obtenidas por AF y LSN. El sesgo entre las metodologías es constante a lo largo de todo el rango de micras de la lana uruguaya ensayada, aunque se registra una diferencia mínima promedio. Este resultado respalda directamente la hipótesis de que el LSN puede ser utilizado como un sustituto directo y equivalente del AF para la certificación del DMF de la lana uruguaya.

TABLA 2. Análisis de regresión para el sesgo dependiente del nivel (IWTO-0).

Regresión	Pendiente	Significación	Error estándar	Valor <i>t</i>	Valor <i>p</i>	R2
Media Geométrica	0,99	NS	0,01	1,22	0,22	0,99
Diferencia vs Promedio	-0,01	NS	0,01	1,22	0,22	
Punto de corte (Media Geométrica)	0,17					
Punto de corte (Diferencia vs Promedio)	0,17					
Error Estándar de la Estimación	0,30					

Existen trabajos técnicos que establecen que pueden generar sesgos sistemáticos entre el AF y el LSN en función del DMF (Baxter, 1999). Heath et al. (2006) indican que uno de los instrumentos podría arrojar valores consistentemente mayores que el otro en rangos diamatrales específicos. Además, estos sesgos pueden estar modulados por el origen geoclimático de la lana, un factor que influye en las características de la fibra. No obstante, en el contexto de Uruguay, esta variabilidad se considera menos determinante debido a la homogeneidad de las zonas agroclimáticas y la similitud de los sistemas de producción. No hubo sesgo estadísticamente significativo, por lo que tal vez los resultados no mostraron un sesgo estadísticamente significativo sobre el rango de micras en el clip uruguayo.



Existen trabajos técnicos que establecen que pueden generar sesgos sistemáticos entre el método Airflow (AF) y el Laserscan (LSN) en función del DMF (DMF) (Baxter, 1999). Autores como Heath et al. (2006) indican que esta diferencia no es aleatoria, sino que uno de los instrumentos podría arrojar valores consistentemente mayores que el otro en rangos diamatrales específicos.

Adicionalmente, estos sesgos pueden estar modulados por factores geoclimáticos que influyen en las características físicas de la fibra (como su curvatura o contenido de grasa). No obstante, en el contexto de la producción de lana de Uruguay, esta variabilidad se considera menos determinante debido a la alta homogeneidad de las zonas agroclimáticas y la similitud de los sistemas de producción.

Este factor resultó ser clave: el análisis estadístico realizado en la lana uruguaya no mostró un sesgo estadísticamente significativo sobre el rango de micras estudiado, lo cual soporta la hipótesis de que la homogeneidad de la fibra minimiza los problemas de concordancia entre instrumentos.

Por otra parte, la alta correlación observada en el presente estudio entre AF y LSN sugiere un comportamiento de concordancia que difiere de algunos trabajos. Por ejemplo, Downes (1992) señala que el AF, al estimar el DMF a partir del área superficial de las fibras, puede verse afectado por la variabilidad geométrica natural (elipticidad y heterogeneidad diametral), lo que podría alterar el flujo de aire y, sesgar el valor de DMF en comparación con la medición directa del LSN. Richards (1954) subraya la sensibilidad del AF a la presencia de contaminantes residuales (materia vegetal o grasa), los cuales alteran la porosidad de fibras, resultando en una estimación errónea del DMF y generando divergencias con los resultados de LSN.

La minimización de estas fuentes de variabilidad exige el estricto cumplimiento de los estándares internacionales. Las normas IWTO-28 (para AF) e IWTO-12 (para LSN) (International Wool Textile Organisation, 2012) establecen los procedimientos obligatorios de estandarización y calibración. El incumplimiento en el mantenimiento o la calibración inadecuada de estos equipos puede invalidar los resultados, generando diferencias entre laboratorios que comprometen la exactitud de las estimaciones del DMF (International Wool Textile Organization, 2025).

Debido a lo anterior, adquiere importancia el mantenimiento riguroso de las calibraciones, el cuidado del equipamiento y el entrenamiento especializado del personal. Las diferencias en la estimación del DMF no se deben únicamente a las variaciones inherentes de la fibra natural, sino también a la variabilidad operacional (factor humano) y la condición instrumental (International Wool Textile Organization, 2025). La implementación de un Sistema de Gestión de Calidad (SGC) que mantenga la trazabilidad de los entrenamientos y el control periódico de los procesos rutinarios es esencial.

Si bien el LSN, al automatizar la medición, reduce el potencial error atribuible al operador en el proceso de medición, la competencia técnica del personal sigue siendo crítica para la preparación de la muestra, la calibración, y el chequeo periódico del correcto funcionamiento. Este rigor es indispensable para la certificación del DMF a nivel global y para asegurar la confianza comercial en los mercados internacionales de lana que emplean el LSN como método de referencia.

CONCLUSIONES

La transición hacia el uso del método LSN para la certificación del DMF, sin la obligación de reportar concomitantemente los resultados de AF, sitúa a Uruguay en alineación estratégica con los principales países productores de lana fina (como Australia, Sudáfrica y Nueva Zelanda), que emplean el LSN como método de certificación predeterminado (default) (Dawes et al., 2018; Heath et al., 2006; Sommerville, 2007). Esta homologación de estándares tiene el potencial de simplificar las transacciones en el comercio internacional y minimizar la confusión para los compradores a nivel global.

La eliminación del requisito de una medición adjunta por AF generaría una reducción directa en los costos operativos de ensayo para los productores laneros uruguayos.

Adicionalmente, el método LSN proporciona datos paramétricos suplementarios, como el CV, que constituye información de alto valor predictivo para los procesadores, permitiéndoles anticipar el comportamiento de la lana en las etapas industriales subsiguientes. Esta información de valor agregado puede contribuir a incrementar la valorización y la comercialización de la lana de origen uruguayo.

Este informe ha sintetizado la relación metrológica entre las mediciones del DMF obtenidas por los métodos AF y LSN en un espectro representativo de la lana uruguaya. Se ha demostrado fehacientemente que ambos procedimientos para la medición del DMF exhiben una elevada correlación estadística y producen resultados consistentes con un sesgo mínimo. Los análisis estadísticos confirman que ambas metodologías son confiables y pueden ser utilizadas de forma intercambiable en los ensayos de calidad de la fibra.

Los resultados empíricos observados son análogos a los reportados en otros países clave productores de lana fina que han culminado la transición tecnológica del Airflow al Laserscan para la certificación del DMF. Esta progresión tecnológica ha permitido que tanto los productores como los procesadores se beneficien de los datos adicionales proporcionados por la nueva tecnología.

En función de estos hallazgos, se recomendó la modificación de las Regulaciones de Ensayo Central (Core Test Regulations) de la IWTO con el objetivo de permitir que la lana de origen uruguayo sea certificada para el DMF basándose exclusivamente en el método Laserscan (IWTO-12) (International Wool Textile Organisation, 2012), sin la necesidad de la medición complementaria por Airflow (IWTO-28) (International Wool Textile Organisation, 2013).

La enmienda propuesta a la Nota 2 de la Cláusula 4.2.2 fue la siguiente:

"La lana en bruto procedente de Australia, Sudáfrica y las Islas Malvinas, Uruguay y la lana en bruto Merino de Nueva Zelanda, a menos que se especifique lo contrario en un contrato, no requerirá una medición complementaria del Diámetro Medio de Fibra por IWTO-28 ('Airflow')" (International Wool Textile Organisation, 2013).

Esta enmienda fue aprobada oficialmente en el Congreso de la IWTO en Lille en 2025. Como resultado directo, la lana uruguaya ahora puede ser certificada directamente mediante la metodología Laserscan. Esto representa un avance significativo para la agroindustria lanera nacional, dado que simplifica el proceso de certificación y agiliza sustancialmente el comercio internacional.

REFERENCIAS

- Abella, I. y Piegas, F., 2024. Situación y perspectivas de la cadena ovina. En: Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. *Anuario OPYPA 2024: análisis sectorial y cadenas productivas* [En línea]. Cap. 3. Montevideo: MGAP y OPYPA. [Consulta: 23 de enero de 2025]. Disponible en: <https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/Anuarioopypa2024/CP/3/CP3web/CP3-Cadenaorina.pdf>.
- Altman, D. G. y Bland, J. M., 1983. Measurement in medicine: the analysis of method comparison studies. En: *The Statistician*, 32(3), pp. 307–317.
- Baxter, B. P., 1998. Comparison of Laserscan, OFDA and airflow on raw wool samples. En: IWTO. *IWTO Raw Wool Group Conference, Nice, December 1998* [En línea]. Bruselas: IWTO. [Consulta: 01 de febrero de 2025]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/269991416_Comparison_of_Laserscan_OFDA_and_airflow_on_raw_wool_samples.
- Baxter, B. P., 1999. Influences on comparisons between the mean fibre diameter of wools measured by airflow and by projected image methods. En: *Wool Technology and Sheep Breeding*, 47(4), pp. 263–274.
- Buonaccorsi, J. P., 1996. Measurement error in the response in the general linear model. En: *Journal of the American Statistical Association*, 91(436), pp. 1614–1622.
- Dawes, A. L.; Cranswick, P. M. y Knowles, D. G., 2018. The relationship between mean fibre diameter measurements by airflow and Laserscan for Falkland Islands wool. En: IWTO. *87th Annual Congress*. Hong Kong, China, (14-16 de mayo de 2018). Bruselas: IWTO. (Submission No: RMG Sub 01)
- Downes, J. G., 1992. The effect of the ellipticity of fibres on diameter measurement by the airflow method. En: *Journal of the Textile Institute*, 83(2), pp. 245–252.
- Heath, W. A.; Barkhuizen, J. W. y Wright, O. E., 2006. The relationship between mean fibre diameter measurements by airflow and Laserscan for South African Wools. En: International Wool Textile Organization. *IWTO Technology & Standards Committee, Raw Wool Group. Cairo Meeting, Report RWG 03*. Bruselas: IWTO.
- International Wool Textile Organization, 2006. *IWTO-52: Conditioning procedures for testing textiles*. Bruselas: IWTO.
- International Wool Textile Organisation, 2012. *IWTO-12: Measurement of the mean and distribution of fibre diameter using the Sirolan-Laserscan fibre diameter analyser*. Brussels: IWTO.
- International Wool Textile Organisation, 2013. *IWTO-28: Determination by the airflow method of the mean fibre diameter of cores samples of raw wool*. Brussels: IWTO.
- International Wool Textile Organization, 2020. *IWTO-0: Introduction to IWTO Specifications: procedures for the development, review, progression or relegation of IWTO Test Methods and Draft Test Methods*. Bruselas: IWTO.
- International Wool Textile Organization, 2023. *IWTO core test regulations: IWTO core test regulations*. Bruselas: IWTO.
- International Wool Textile Organization, 2025. *IWTO Congress 2025* [En línea]. Bruselas: IWTO. [Consulta: 26 de septiembre de 2025]. Disponible en: <https://iwto.org/congress-2025/>

- Piezas, F., 2024. *Diagnóstico y caracterización de la cadena ovina en Uruguay* [En línea]. Montevideo: MGAP y OPYPA. [Consulta: 13 de enero de 2025]. Disponible en: <https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/Anuarioopypa2024/ESTUDIOS/13/E13web/E13-Diagnosticoycaracterizacion.pdf>
- Richards, N., 1954. *The effect of oil and other changes on the results obtained by the airflow method for measuring wool fibre diameter*. Bruselas: IWTO. (IWTO Technical Report).
- Secretariado Uruguayo de la Lana, SUL, s.d. *Secretariado Uruguayo de la Lana* [En línea]. Montevideo: SUL. [Consulta: 12 de enero de 2025]. Disponible en: <https://www.sul.org.uy/>
- Sommerville, P., 2007. *Fundamental principles of fibre fineness measurement*. Kensington: AWTa Ltd.
- Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, 2023. *Anuario Estadístico Agropecuario 2023* [En línea]. Montevideo: MGAP. [Consulta: 12 de enero de 2025]. Disponible en: <https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2023/ANUARIO2023WEB.pdf>

Resultados de la primera comparación interlaboratorio en humedad relativa en Panamá: fortalecimiento de la capacidad técnica y aseguramiento de la calidad de las mediciones

Results of the first interlaboratory comparison of relative humidity in Panama: strengthening technical capacity and assuring the quality of measurements

Resultados da primeira comparação interlaboratorial sobre humidade relativa no Panamá: reforço da capacidade técnica e garantia de qualidade das medições

- ✉ FANNY CASTRO (1)
- ✉ EBONY PRADO (1)
- ✉ HÉCTOR ACEVEDO (1)
- ✉ JULIO GONZÁLEZ VANNUCCI (1)
- ✉ ÁNGEL ALFREDO ESCORCHE (2)
- ✉ DIEGO ROMERO VELÁSQUEZ (3)
- ✉ ERICK DOMÍNGUEZ (4)

(1) Centro Nacional de Metrología de Panamá (CENAMEP AIP), Panamá.

(2) Metricontrol Laboratories, S.A., Panamá.

(3) P&P Calibration Lab., Panamá.

(4) Soluciones Integrales en Gestión de Calidad, S.A. (SIGSA), Panamá.

RECIBIDO: 28/7/2025 → APROBADO: 15/10/2025 ✉ eprado@cenep.org.pa.

RESUMEN

Las comparaciones interlaboratorio tienen como principal objetivo evaluar el grado de equivalencia entre el laboratorio piloto y los laboratorios participantes. De esta manera se puede validar los métodos de calibración, detectar oportunidades de mejora y realizar correcciones en los sistemas de medición, entre otros aspectos. En el año 2024 durante los meses de marzo a agosto, se realizó en Panamá la primera comparación interlaboratorio en calibración de medidores de humedad relativa organizada y pilotada por el Centro Nacional de Metrología de Panamá (CENAMEP AIP) en el rango de 30 a 90 % HR con temperatura de referencia de 20 °C. Participaron en este ejercicio de

intercomparación tres laboratorios secundarios del país y dos técnicos en entrenamiento del Laboratorio de Humedad Relativa (H0) del CENAMEP AIP. Para el análisis de los resultados se utilizó la herramienta estadística del error normalizado, mediante la cual se determinó que aproximadamente el 85 % de las mediciones fue satisfactorio, lo que indica un buen nivel de concordancia entre los resultados obtenidos y los valores de referencia. La realización de este ejercicio permitió implementar acciones correctivas y preventivas oportunas, además de reforzar la credibilidad de los participantes ante clientes, organismos reguladores y demás partes interesadas.

Palabras clave: error normalizado, higrómetro, humedad relativa, incertidumbre, patrón.

ABSTRACT

The main objective of interlaboratory comparisons is to evaluate the degree of equivalence between the pilot laboratory and the participating laboratories. In this way it is possible to validate calibration methods, detect opportunities for improvement and make corrections in the measurement systems, among other topics. In the year 2024, during the months of March to August, the first interlaboratory comparison in calibration of relative humidity metrics was carried out in Panama, organized and piloted by the National Metrology Center of Panama (CENAMEP AIP) in the range of 30 to 90 % RH with a reference temperature of 20 °C. Three secondary laboratories in the country and two technicians in training from the Relative Humidity Laboratory (H0) of CENAMEP AIP participated in this intercomparison exercise. For the analysis of the results, the statistical tool of the normalized error was used, which determined that approximately 85 % of the measurements were satisfactory, indicating a good level of agreement between the obtained results and the reference values. This exercise made it possible to implement timely corrective and preventive actions and to reinforce the credibility of the participants with clients, regulatory agencies and other interested parties.

Keywords: hygrometer, relative humidity, standard error, standard, uncertainty.

RESUMO

O principal objetivo das comparações interlaboratoriais é avaliar o grau de equivalência entre o laboratório piloto e os laboratórios participantes. Dessa forma, é possível validar métodos de calibração, detectar oportunidades de melhoria, fazer correções nos sistemas de medição, entre outros. No ano de 2024, durante os meses de março a agosto, foi realizada a primeira comparação interlaboratorial na calibração de medidores de umidade relativa no Panamá, organizada e pilotada pelo Centro Nacional de Metrologia do Panamá (CENAMEP AIP) na faixa de 30 a 90 % UR com uma temperatura de referência de 20 °C. Três laboratórios secundários do país e dois técnicos estagiários do Laboratório de Umidade Relativa (H0) do CENAMEP AIP participaram desse exercício de intercomparação. Para a análise dos resultados, foi utilizada a ferramenta estatística de erro padrão, que determinou que aproximadamente 85 % das medições foram satisfatórias, indicando um bom nível de concordância entre os resultados obtidos e os

valores de referência. Esse exercício permitiu ações corretivas e preventivas em tempo hábil e reforçou a credibilidade dos participantes junto a clientes, reguladores e outras partes interessadas.

Palavras-chave: erro padrão, higrómetro, humidade relativa, incerteza, padrão.

INTRODUCCIÓN

El Centro Nacional de Metrología de Panamá (CENAMEP AIP) tiene entre sus funciones promover el desarrollo de la metrología en el país (Panamá, 2007; Centro Nacional de Metrología de Panamá (CENAMEP AIP), 2023); por esta razón se realizan con alta frecuencia ejercicios de comparaciones interlaboratorio, donde participan los laboratorios secundarios del país que se dedican a la prestación de diversos servicios de calibración.

Hasta el año 2023 no se tenían registros de ejercicios de intercomparaciones nacionales en la magnitud de humedad relativa, específicamente en la calibración de higrómetros. Por esta razón, se convocó a posibles interesados, acción en la que tres laboratorios secundarios manifestaron su interés en participar, ya que ofrecen el servicio de calibración de higrómetros. Además, dichos laboratorios señalaron su satisfacción a la iniciativa liderada por el CENAMEP AIP de organizar este ejercicio de comparación, considerando el alto costo que implica para ellos contratar de forma individual los servicios de ensayos de aptitud con entidades o laboratorios fuera del país, siendo este un requisito necesario para sustentar sus acreditaciones y validaciones de métodos. De esta manera, y luego de una reunión de homologación, se organizó la primera comparación interlaboratorio en medidores de humedad relativa (higrómetros), donde el CENAMEP AIP tuvo las funciones de organizar, pilotar (asignación del valor de referencia), analizar, evaluar los datos enviados por los participantes y finalmente elaborar el informe de los resultados generados.

En adición a los tres laboratorios secundarios, en este ejercicio se incluyó como participantes a dos metrólogos del CENAMEP AIP que al momento de la organización de este ejercicio se encontraban en entrenamiento en el *Laboratorio de Humedad Relativa (H0)*. Estos técnicos requerían, como última tarea para la autorización del servicio de calibración de medidores de humedad por el método dos presiones, participar y obtener resultados satisfactorios en una comparación (interna con su instructor o externa con otro INM). De esta manera, además del piloto, la intercomparación contó con cinco participantes.

Los objetivos alineados a este ejercicio de intercomparación comprenden: evaluar el grado de equivalencia de las calibraciones de medidores de humedad relativa entre el laboratorio piloto y los participantes, proporcionar un recurso orientado al aseguramiento de la calidad de los resultados emitidos por los participantes ante sus clientes y demás partes interesadas (International Organization for Standardization, 2017), proveer una herramienta objetiva para que los participantes demuestren su competencia técnica e incrementen su experiencia en ejercicios de comparación interlaboratorio y, adicionalmente, para los metrólogos en entrenamiento del CENAMEP AIP, obtener la autorización para la prestación del servicio de calibración de higrómetros por el método de comparación en un generador de humedad por dos presiones.

Se escogieron para este ejercicio como patrones viajeros dos higrómetros capacitivos (sensor y lector), ya que este tipo de sensores son los más utilizados para las mediciones de humedad (Bentley, 1998). Los equipos seleccionados son propiedad del CENAMEP AIP y según las especificaciones técnicas tienen exactitud $\pm 1\% \text{ HR}$. Se decidió realizar las mediciones en el rango de 30 a 90 % HR con temperatura de referencia de 20 °C, debido a que el *Laboratorio de Humedad Relativa (H0)* del CENAMEP AIP cuenta con una capacidad de calibración y medición (CMC) reconocida en el Buró Internacional de Pesas y Medidas (BIPM, por su abreviatura en inglés) en el alcance mencionado, lo que respalda y sustenta la comparación interlaboratorio realizada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Laboratorios participantes

Participaron tres laboratorios secundarios nacionales de Panamá y dos metrólogos en entrenamiento pertenecientes al *Laboratorio de Humedad Relativa (H0)* de CENAMEP AIP. Con el fin de salvaguardar la confidencialidad de los resultados emitidos, a cada participante, incluyendo a los dos metrólogos internos de CENAMEP AIP en entrenamiento, se les asignó de forma aleatoria un código único con el cual reportaron los resultados obtenidos individualmente.

El personal del *Laboratorio de Humedad Relativa* del CENAMEP AIP se encargó de la organización, redacción del protocolo, transporte de patrones viajeros, recopilación de datos, asignación del valor de referencia, estudio de estabilidad de los patrones viajeros, evaluación de los resultados de los participantes y emisión del informe final de resultados.

Patrones viajeros y rango de medición

En este estudio se utilizaron dos higrómetros capacitivos, de marca HUMICAP Vaisala HM70 (Vaisala Oyj, 2007) cuyas características se describen en la Tabla 1.

Por otro lado, los puntos de medición establecidos en el protocolo de la intercomparación realizada en Panamá se muestran en la Tabla 2.

TABLA 1. Patrones de transferencia utilizados en la comparación interlaboratorio.

Cantidad	Marca	Modelo	Clase de exactitud	Alcance	Número de serie
1	Vaisala	Indicador MI70 y sonda HMP77	$\pm 1\% \text{ HR}$	0 % HR a 90 % HR	Indicador: V1710628
					Sensor: V2310437
1	Vaisala	Indicador MI70 y sonda HMP77	$\pm 1\% \text{ HR}$	0 % HR a 90 % HR	Indicador: G2930019
					Sensor: G3120001



TABLA 2. Puntos de medición en humedad relativa y temperatura de referencia.

Temperatura de referencia en la cámara (°C)*	Puntos nominales de medición en humedad relativa (% HR)			
20	30	50	70	90

*Temperatura en la cámara al momento de realizar las mediciones de la comparación interlaboratorio.

El proceso de medición inició en el *Laboratorio de Humedad Relativa (H0)* del CENAMEP AIP (piloto); posteriormente midieron los dos metrólogos en entrenamiento y nuevamente midió el piloto. Luego, los patrones de transferencia fueron trasladados por personal del CENAMEP AIP a los tres restantes laboratorios participantes en Panamá. En cada uno de ellos, las mediciones fueron realizadas por el personal especializado del laboratorio receptor, siguiendo sus propios procedimientos de calibración. Una vez finalizadas todas las rondas de mediciones en los laboratorios participantes, el laboratorio piloto (CENAMEP AIP) realizó una ronda final de medición, con el objetivo de asegurar la calidad de los datos obtenidos y estudiar la posible deriva de los patrones viajeros durante el proceso. Al final del ejercicio, los resultados por parte de los participantes corresponden a un total de 40 mediciones.

Mensurando y consideraciones generales para la realización de las mediciones

En el protocolo de la intercomparación, elaborado por el laboratorio piloto y consensuado con los participantes, se definió que el mensurando, es decir la magnitud que se desea medir (Joint Committee for Guides in Metrology, 2012) sería la corrección en humedad relativa de los patrones viajeros en cada punto de calibración (ecuación 1).

$$\text{Corrección (\% HR)} = (\% \text{ HR})_{\text{Patrón LABp}} - \% \text{ HR}_{\text{Instrumento bajo prueba}} \quad (1)$$

Donde:

Corrección: es la diferencia entre la humedad relativa indicada por el patrón del laboratorio participante y la humedad relativa indicada por patrón viajero (instrumento bajo prueba), ambos en % HR en cada valor nominal de humedad relativa acordado y a la temperatura de 20 °C.

% HR_{Patrón LABp}: es el valor del patrón en humedad relativa del laboratorio participante.

% HR_{Instrumento bajo prueba}: es el valor del instrumento bajo prueba (patrón viajero).

Para la obtención de los valores de corrección de los patrones viajeros, cada participante utilizó los procedimientos de medición internos de su laboratorio, aplicables para la calibración de higrómetros o medidores de humedad relativa. Las incertidumbres asociadas al valor de corrección, reportadas tanto por los participantes como por el piloto, se estimaron siguiendo los procedimientos internos de cada laboratorio y según lo establecido por el método GUM del BIPM (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008). Cabe resaltar que los valores reportados por el piloto se utilizaron como valores



de referencia para el cálculo del error normalizado; el CENAMEP AIP tomó en cuenta las componentes de histéresis y la estabilidad de los instrumentos durante la ejecución de la comparación.

También se estableció en el protocolo que los participantes debían seguir las siguientes instrucciones:

- Al final de la toma de datos, el valor medio corregido de la indicación del patrón de referencia en humedad del participante debe indicar el valor nominal con una tolerancia de $\pm 0.3\% \text{ HR}$; y, el valor medio corregido de la indicación del patrón de referencia en temperatura del participante debe indicar el valor nominal con una tolerancia de $\pm 0.3^\circ\text{C}$.
- El participante no debe realizar ajustes en los patrones viajeros (ni en indicador, ni en sensor).
- Los patrones viajeros son operados con baterías recargables. Éstas deben ser cargadas antes de utilizar el equipo.
- Las mediciones deben realizarse con la sonda modelo HMP77 (con número de serie V2310437), conectada al puerto "Probe Port I" del indicador MI70 con serie V1710628.
- Las mediciones deben realizarse con la sonda modelo HMP77 (con número de serie G3120001), conectada "Probe Port I", del indicador MI70 con serie G2930019.

Método de medición de los laboratorios participantes

El método utilizado por los tres laboratorios secundarios participantes fue por comparación directa del valor de humedad relativa indicada por un higrómetro patrón respecto a la indicación en humedad relativa de los patrones viajeros.

Los tres laboratorios utilizaron como medios cámaras con control de temperatura y humedad relativa para obtener los puntos de calibración acordados en el protocolo, manteniendo una temperatura en la cámara de 20°C .

En cuanto a los dos metrólogos en etapa de entrenamiento del *Laboratorio de Humedad Relativa (H0)* del CENAMEP AIP, ambos utilizaron el método de comparación del valor de humedad relativa de referencia obtenido por el método de dos presiones contra el valor indicado por los patrones viajeros. Este es el mismo método utilizado por el piloto para asignar el valor de referencia.

Método de medición utilizado por el laboratorio piloto

La corrección del valor de humedad relativa indicada por los patrones viajeros se obtiene por comparación directa del valor de humedad relativa de referencia por el método de generación de humedad por dos presiones y la indicación del instrumento bajo prueba. Las mediciones se realizan en orden ascendente iniciando por el valor más bajo de humedad relativa, manteniendo en la cámara una temperatura de 20°C .

En la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida (GUM) se establece que la indicación de un instrumento puede diferir en una cantidad fija y conocida dependiendo de si las lecturas sucesivas son ascendentes o descendentes, lo que se conoce como histéresis de un instrumento (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008). Con el



objetivo de determinar la histéresis de los instrumentos de la intercomparación, una vez realizadas las mediciones en orden ascendente, se midieron todos los puntos acordados en forma descendente iniciando por el valor más alto (90 % HR) hasta alcanzar el valor más bajo (30 % HR), tal cual lo establece el procedimiento interno de calibración del laboratorio piloto.

Obtención del valor de humedad relativa de referencia (laboratorio piloto)

Para la obtención del valor de humedad relativa de referencia (ecuación 2), el *Laboratorio de Humedad Relativa (H0)* del CENAMEP AIP cuenta con un generador de humedad por dos presiones. El principio de funcionamiento del generador de humedad por dos presiones implica que una corriente de gas a una presión elevada se sature con respecto a la fase líquida o sólida del agua, para luego expandirla isotérmicamente a una presión inferior. Las mediciones de presión y temperatura de la corriente de gas, tanto en el saturador como en la cámara de pruebas después de la expansión, proporcionan los datos necesarios para calcular el contenido de vapor de agua de la corriente de gas (Hasegawa y Little, 1977; Thunder Scientific Corporation, 2023; Hardy, 1998).

$$\% \text{ HR (referencia)} = \frac{f_w(P_s, T_s)}{f_w(P_c, T_c)} \frac{e_w(T_s)}{e_w(T_c)} \frac{(P_c)}{(P_s)} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

$f_w(P_s, T_s)$: es el factor de mejoramiento en temperatura y presión del saturador.

$f_w(P_c, T_c)$: es el factor de mejoramiento en temperatura y presión de la cámara.

$e_w(T_s)$: es el factor de presión de vapor de saturación efectiva del aire con respecto al agua a presión absoluta P y temperatura en el saturador.

$e_w(T_c)$: es el factor de presión de vapor de saturación efectiva del aire con respecto al agua a presión absoluta P y temperatura en la cámara.

P_c : es la presión de la cámara en pascales.

P_s : es la presión del saturador en pascales.

Ambos factores de corrección se calcularon para las mediciones de presión y temperatura efectuadas en el saturador del generador ($f_w(P_s, T_s)$; $e_w(T_s)$) y en la cámara de prueba del generador (espacio donde se colocaron los objetos a calibrar) ($f_w(P_c, T_c)$; $e_w(T_c)$), para finalmente aplicar la ecuación 2 de humedad relativa de referencia (Castro et al., 2023).

Cálculo de incertidumbre del laboratorio piloto: presupuesto

En la Tabla 3 se presenta el presupuesto de incertidumbre para el punto de 30 % HR para el sensor V2310437 / indicador V1710628. En dicho presupuesto se plasman las componentes que se consideraron en el sistema de medida del laboratorio piloto (método de dos presiones).



TABLA 3. Presupuesto de incertidumbre para el punto de medición 30 %HR.

Fuente	Valor	Unidad	Distribución de probabilidad	Divisor	c _i	Varianza	Grados de libertad
Componentes por presión de la cámara	195.686	Pa	Normal	1	6.93E-04	0.01838	5000
Componentes por presión del saturador	204.397	Pa	Normal	1	-4.87E-04	0.00991	5000
Componentes por temperatura de cámara	0.060	°C	Normal	1	-4.34	0.06780	5000
Componentes por temperatura del saturador	0.048	°C	Normal	1	4.34223032	0.04344	5000
Factor de mejora del generador 2500	0.0528	% HR	Rectangular	1.7	1	0.00093	50
Diferencia (RH calculado vs. generado)	0.07	% HR	Rectangular	1.7	1	0.00187	19
Factor e (Ts) ecuación de Wexler (factor e de la cámara)	0.0010	% HR	Rectangular	1.7	1	0.00000	50
Factor e (Tc) ecuación de Wexler (factor e del saturador)	0.0010	% HR	Rectangular	1.7	1	0.00000	50
Factor f (Ts, Ps) ecuación de Greenspan para el saturador	8.14E-05	% HR	Rectangular	1.7	1	0.00000	50
Factor f (Tc, Pc) ecuación de Greenspan para la cámara	5.65E-05	% HR	Rectangular	1.7	1	0.00000	50
Comparación en humedad (diferencia con respecto a la HR a partir de Td)	0.42	% HR	Rectangular	1.7	1	0.05880	50
Resolución del OBC	0.01	% HR	Rectangular	3.5	1	0.00001	50
Repetibilidad del OBC	0.03	% HR	Rectangular	3.2	1	0.00009	9
Histéresis del OBC	0.28	% HR	Rectangular	3.5	1	0.00653	29
Incertidumbre combinada (uc)						0.21	
Grados efectivos de libertad (Veff)						2893	
Factor de cobertura (k)						2	
Incertidumbre expandida (U)						0.89	

Las componentes por presión de la cámara incluyen: calibración, resolución, repetibilidad y deriva del transductor de presión utilizado. Las componentes por presión del saturador incluyen: calibración, resolución, repetibilidad y deriva del transductor de presión utilizado. Las componentes por temperatura de la cámara incluyen: calibración, resolución, repetibilidad, deriva e histéresis del termómetro utilizado; además, estabilidad y homogeneidad en la cámara de prueba. Las componentes por temperatura del saturador incluyen: calibración, resolución, repetibilidad, deriva e histéresis del termómetro utilizado; además, estabilidad, uniformidad, eficiencia, impurezas del aire y del agua en el saturador.

Caracterización de los patrones viajeros

El vocabulario internacional de metrología establece que la estabilidad de un instrumento de medida se define como la aptitud de un instrumento de medida para conservar constantes sus características metrológicas a lo largo del tiempo, por ejemplo, en términos de cambio de una propiedad en un intervalo de tiempo determinado (Joint Committee for Guides in Metrology, 2012).

Para la ejecución de esta intercomparación, los equipos bajo prueba fueron medidos inicialmente por el laboratorio piloto en tres ocasiones (entre marzo y junio de 2024) y posterior a las mediciones de los participantes (en agosto de 2024), para un total de cuatro rondas de mediciones. Esto es sin contar las mediciones de los metrólogos en entrenamiento, quienes formaron parte de los participantes de la intercomparación.

Estas mediciones se realizaron para determinar la estabilidad de los patrones viajeros durante la realización de la comparación interlaboratorio. En la Tabla 4 se presenta la estabilidad de los higrómetros (patrones viajeros) utilizados durante la intercomparación. Se definió la estabilidad de los patrones viajeros en cada punto de medición como la mayor diferencia encontrada entre las correcciones de los objetos en las cuatro mediciones realizadas por el piloto. En consecuencia, el laboratorio piloto agregó el valor de la estabilidad encontrada dentro de su presupuesto de incertidumbre para esta comparación interlaboratorio.

TABLA 4. Estabilidad de los patrones viajeros entre marzo y agosto de 2024.

Patrones viajeros	Punto [% HR]	Máxima diferencia* [% HR]
Sensor: V2310437 Indicador: V1710628	30	0.25
	50	0.66
	70	0.28
	90	0.12
Sensor: G3120001 Indicador: G2930019	30	0.13
	50	0.47
	70	0.20
	90	0.16

*Máximo menos mínimo de las mediciones realizadas entre marzo y agosto de 2024.



Adicionalmente, en las Figuras 1 y 2 se presentan las mediciones en cada punto de calibración de los patrones viajeros sensor V2310437 con indicador V1710628 y sensor G3120001 con indicador G2930019, respectivamente.

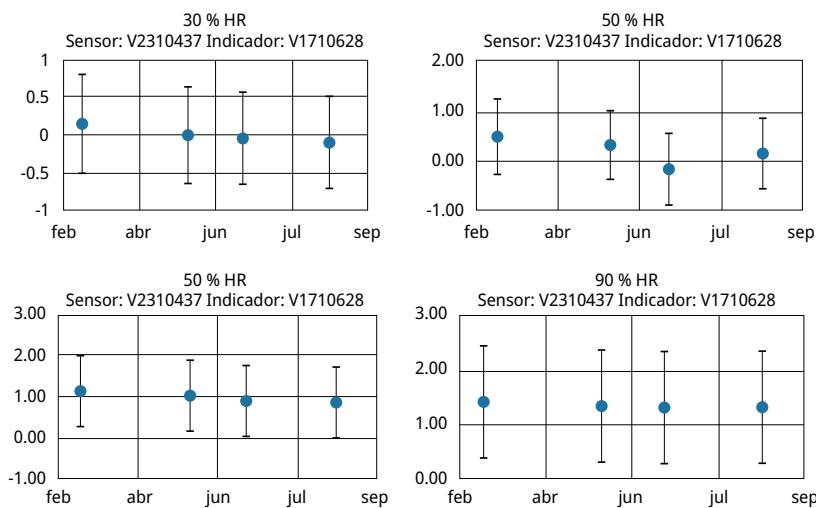


FIGURA 1. Estabilidad del sensor V2310437 con indicador V1710628. Los marcadores en color azul representan los valores de estabilidad obtenidos en las cuatro mediciones realizadas por el piloto, para cada uno de los puntos de calibración. Las barras asociadas a cada marcador indican la incertidumbre expandida de dichas mediciones. La mayor diferencia encontrada en cada punto define la estabilidad del sensor durante la intercomparación.

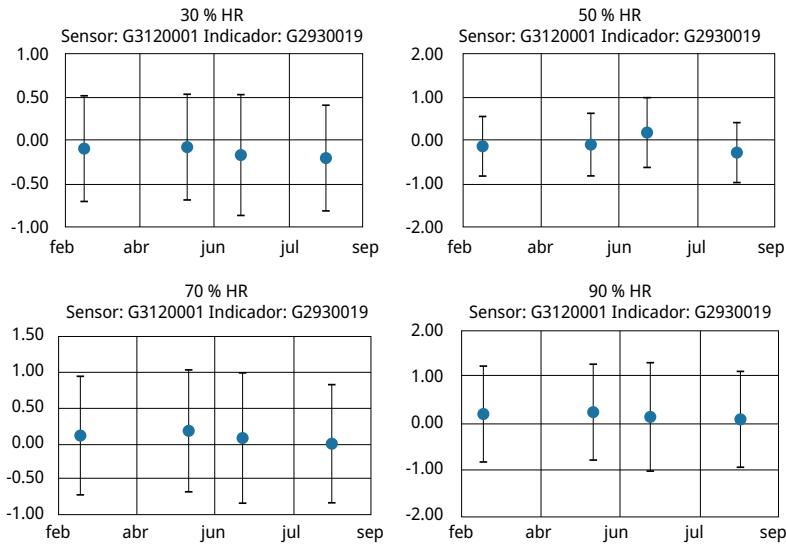


FIGURA 2. Estabilidad del sensor G3120001 con indicador G2930019. Los marcadores en color azul representan los valores de estabilidad obtenidos en las cuatro mediciones realizadas, para cada uno de los puntos de calibración. Las barras asociadas a cada

marcador indican la incertidumbre expandida correspondiente a dichas mediciones. La mayor diferencia encontrada en cada punto define la estabilidad del sensor durante la intercomparación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Reporte de resultados de los participantes

En la Tabla 5 se presentan las correcciones con sus respectivas incertidumbres para cada punto nominal de humedad relativa medido por cada participante para cada patrón viajero.

Adicionalmente, en las Figuras 3 y 4 se presentan los resultados de todos los participantes con sus respectivas barras de incertidumbre. El orden en el que aparecen los resultados no corresponde necesariamente al orden en que midieron los participantes. Cada participante está identificado con un *código asignado al inicio de la comparación* y el valor de referencia asignado por el piloto se identifica como "CENAMEP AIP".

TABLA 5. Correcciones e incertidumbres expandidas de los participantes.

Participante 30 % HR	Sensor G3120001 con indicador G2930019				Sensor G3120001 con indicador G2930019			
	50 % HR	70 % HR	90 % HR	30 % HR	50 % HR	70 % HR	90 % HR	
TH15	C	-0.13	-0.14	0.29	0.18	-0.13	-0.14	0.29
	U	0.66	0.75	0.91	1.05	0.66	0.75	0.91
TH54	C	0.05	0.37	1.06	0.90	0.05	0.37	1.06
	U	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
TH35	C	-0.15	-0.15	0.05	0.18	-0.15	-0.15	0.05
	U	0.60	0.70	0.84	1.02	0.60	0.70	0.84
TH46	C	-1.32	-1.85	-2.25	-1.92	-1.32	-1.85	-2.25
	U	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
TH24	C	-0.72	-0.76	-0.27	0.62	-0.72	-0.76	-0.27
	U	0.70	0.80	0.80	1.00	0.70	0.80	1.00

Donde: C = corrección reportada; U = incertidumbre expandida reportada; temperatura de referencia: 20 °C.



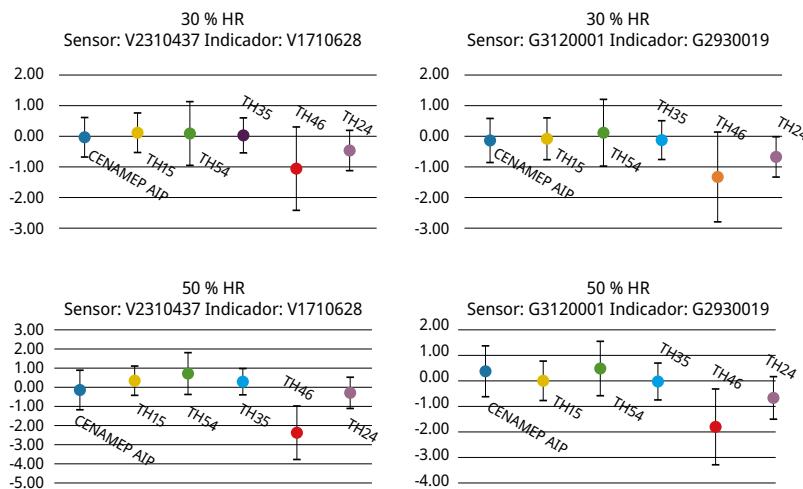


FIGURA 3. Resultados reportados a 30 y 50 % HR con sus barras de incertidumbre. Los marcadores de colores representan los resultados asociados a cada participante.

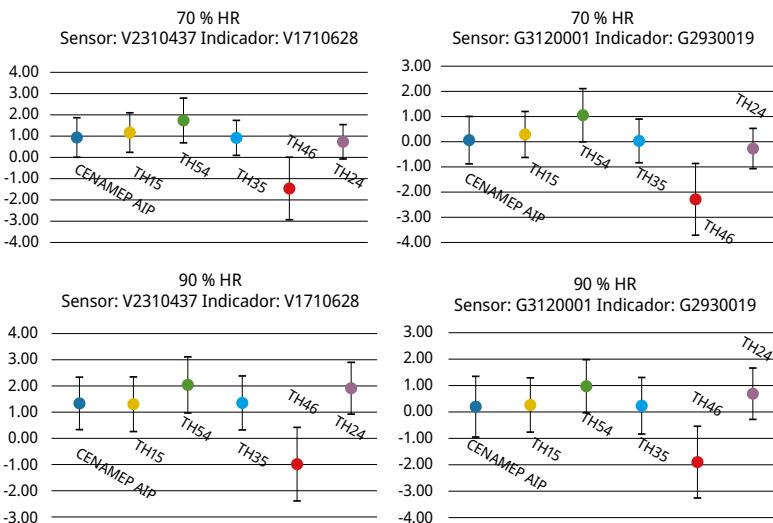


FIGURA 4. Resultados reportados a 70 y 90 % HR con sus barras de incertidumbre. Los marcadores de colores representan los resultados asociados a cada participante.

Presupuesto de incertidumbre de los laboratorios participantes

En las Tablas 6, 7 y 8 se presentan los presupuestos de incertidumbre de los laboratorios participantes (TH54, TH46 y TH24) en el punto de medición de 70 % HR para el sensor V2310437 / indicador V1710628.

TABLA 6. Participante TH54 - Presupuesto de incertidumbre.

Fuente	Tipo de distribución	Incertidumbre estándar
Calibración del patrón	Normal	0.3700
Resolución del patrón	Rectangular	0.0029
Deriva del patrón	Rectangular	0.3233
Interpolación	Rectangular	0.1278
Repetibilidad del patrón	Normal	0.0155
Estabilidad del medio	Normal	0.1155
Uniformidad del medio	Normal	0.0520
Repetibilidad del ítem	Normal	0.0255
Resolución del ítem	Rectangular	0.0029
Incertidumbre combinada estándar [% HR], k = 1	0.523	-
Factor de cobertura, k	2	-
Incertidumbre expandida [% HR]	1.05	-

TABLA 7. Participante TH46 – Presupuesto de incertidumbre.

Fuente	Tipo de distribución	Incertidumbre estándar
Repetibilidad	Normal $\sqrt{2}$	0.00000
Resolución	Rectangular $\sqrt{12}$	0.00029
Estabilidad del medio	Rectangular $\sqrt{3}$	0.00580
Uniformidad del medio	Rectangular $\sqrt{3}$	0.00580
Trazabilidad	Normal 2	0.55000
Resolución patrón	Rectangular $\sqrt{12}$	0.02900
Deriva	Rectangular $\sqrt{12}$	0.43000
Incertidumbre combinada estándar [% HR], k = 1	0.70	-
Factor de cobertura, k	2	-
Incertidumbre expandida [% HR]	1.4	-

TABLA 8. Participante TH24 – Presupuesto de incertidumbre.

Fuente	Tipo de distribución	Incertidumbre estándar
Dispersión lecturas del patrón	Normal	0.028
Calibración del patrón	Normal	0.280
Interpolación del patrón	Rectangular	0.007
Deriva del patrón	Rectangular	0.133
Resolución del patrón	Rectangular	0.003
Gradiente de temperatura	Rectangular	0.231
Estabilidad del medio	Rectangular	0.024
Uniformidad del medio	Rectangular	0.036
Dispersión de lecturas IBC	Normal	-0.017
Resolución del IBC	Rectangular	-0.003
Histéresis del IBC	Rectangular	-0.029
Incertidumbre combinada estándar [% HR], k = 1	0.39	-
Factor de cobertura, k	2	-
Incertidumbre expandida [% HR]	0.78	-

Todos los participantes utilizaron el método de comparación directa contra un higrómetro patrón. Sin embargo, en sus presupuestos de incertidumbre se pueden observar ligeras diferencias en las componentes que tomaron en consideración.

Cada participante desglosó la incertidumbre en componentes individuales (calibración, deriva, estabilidad, uniformidad, resolución, etc.), aplicando la metodología GUM (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008). Entre las fuentes recurrentes en todos los participantes están la calibración del patrón, deriva del patrón, resolución de los patrones y patrones viajeros, así como las condiciones del medio (estabilidad y homogeneidad).

Como se puede observar en las tablas de resultados de los participantes, TH46 reportó la mayor incertidumbre expandida (1.4 % HR), seguido del participante TH54 (que reportó 1.05 % HR) y, por último, la menor incertidumbre expandida reportada fue la de TH24 (con 0.78 % HR). Esto indica diferencias en la forma de estimar y ponderar las fuentes de incertidumbre.

Evaluación de los resultados

El grado de equivalencia entre los resultados de medición reportados por los participantes y los emitidos por el piloto fue determinado mediante el uso de la herramienta estadística denominada error normalizado (E_n), en función de la humedad relativa.

Una medición de comparación es satisfactoria cuando su es igual o inferior a uno y se considera insatisfactoria cuando es superior a uno (International Organization for Standardization, 2023). En este estudio, los valores de E_n se calcularon según la ecuación 3.

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{U_{tab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (3)$$

Donde:

x : es la corrección reportada por el laboratorio participante, en porcentaje de humedad relativa (% HR), para cada punto de calibración.

U_{tab} : es la incertidumbre expandida reportada por el laboratorio participante, en porcentaje de humedad relativa (% HR), para cada punto de calibración.

X : es el valor de referencia (corrección) asignado por el piloto (CENAMEP AIP), en porcentaje de humedad relativa (% HR), para cada punto de calibración.

U_{ref} : es la incertidumbre expandida reportada por el piloto (CENAMEP AIP), en porcentaje de humedad relativa (% HR), para cada punto de calibración.

Los criterios de aceptación para el error normalizado fueron:

Valores de $|E_n| > 1$ indican resultados no satisfactorios.

Valores de $|E_n| \leq 1$ indican resultados satisfactorios.

Para ambos patrones de transferencia, en las Tablas 9 a la 13 se presentan las correcciones, así como las incertidumbres expandidas reportadas por el piloto identificado como "CENAMEP AIP" y los laboratorios participantes identificados con su código y su correspondiente valor de error normalizado.

TABLA 9. Resultados de las mediciones del participante TH15.

T [°C]	% HR*	Sensor V2310437 / Indicador V1710628				Sensor G3120001 / Indicador G2930019					
		CENAMEP AIP		TH15		CENAMEP AIP		TH15			
		C	U	C	U	E _n	C	U	C	U	E _n
		% HR	% HR	% HR	% HR		% HR	% HR	% HR	% HR	
20	30	-0.03	0.67	0.09	0.65	0.1	-0.16	0.71	-0.13	0.66	0.0
20	50	-0.16	1.04	0.35	0.76	0.4	0.24	0.95	-0.14	0.75	0.3
20	70	0.88	0.89	1.17	0.93	0.2	0.07	0.94	0.29	0.91	0.2
20	90	1.31	1.03	1.29	1.05	0.0	0.16	1.15	0.18	1.05	0.0

* Punto de medición (valor nominal).



TABLA 10. Resultados de las mediciones del participante TH54.

T [°C]	% HR*	Sensor V2310437 / Indicador V1710628				Sensor G3120001 / Indicador G2930019					
		CENAMEP AIP		TH54		CENAMEP AIP		TH54			
		C	U	C	U	E _n	C	U	C	U	E _n
		% HR	% HR	% HR	% HR		% HR	% HR	% HR	% HR	
20	30	-0.03	0.67	0.08	1.05	0.1	-0.16	0.71	0.05	1.05	0.2
20	50	-0.16	1.04	0.70	1.05	0.6	0.24	0.95	0.37	1.05	0.1
20	70	0.88	0.89	1.72	1.05	0.6	0.07	0.94	1.06	1.05	0.7
20	90	1.31	1.03	2.03	1.05	0.5	0.16	1.15	0.90	1.05	0.5

* Punto de medición (valor nominal).

TABLA 11. Resultados de las mediciones del participante TH35.

T [°C]	% HR*	Sensor V2310437 / Indicador V1710628				Sensor G3120001 / Indicador G2930019					
		CENAMEP AIP		TH35		CENAMEP AIP		TH35			
		C	U	C	U	E _n	C	U	C	U	E _n
		% HR	% HR	% HR	% HR		% HR	% HR	% HR	% HR	
20	30	-0.03	0.67	0.03	0.60	0.1	-0.16	0.71	-0.15	0.60	0.0
20	50	-0.16	1.04	0.28	0.70	0.4	0.24	0.95	-0.15	0.70	0.3
20	70	0.88	0.89	0.91	0.84	0.0	0.07	0.94	0.05	0.84	0.0
20	90	1.31	1.03	1.32	1.02	0.0	0.16	1.15	0.18	1.02	0.0

* Punto de medición (valor nominal).



TABLA 12. Resultados de las mediciones del participante TH46.

T [°C]	% HR*	Sensor V2310437 / Indicador V1710628				Sensor G3120001 / Indicador G2930019					
		CENAMEP AIP		TH46		CENAMEP AIP		TH46			
		C	U	C	U	E _n	C	U	C		
		% HR	% HR	% HR	% HR		% HR	% HR	% HR		
20	30	-0.03	0.67	-1.06	1.4	0.7	-0.16	0.71	-1.32	1.40	0.7
20	50	-0.16	1.04	-2.35	1.4	1.3	0.24	0.95	-1.85	1.40	1.2
20	70	0.88	0.89	-1.49	1.4	1.4	0.07	0.94	-2.25	1.40	1.4
20	90	1.31	1.03	-0.99	1.4	1.3	0.16	1.15	-1.92	1.40	1.1

* Punto de medición (valor nominal).

TABLA 13. Resultados de las mediciones del participante TH24.

T [°C]	%HR*	Sensor V2310437 / Indicador V1710628				Sensor G3120001 / Indicador G2930019					
		CENAMEP AIP		TH24		CENAMEP AIP		TH24			
		C	U	C	U	E _n	C	U	C		
		%HR	%HR	%HR	%HR		%HR	%HR	%HR		
20	30	-0.03	0.67	-0.49	0.70	0.5	-0.16	0.71	-0.72	0.70	0.6
20	50	-0.16	1.04	-0.24	0.80	0.1	0.24	0.95	-0.76	0.80	0.8
20	70	0.88	0.89	0.69	0.80	0.2	0.07	0.94	-0.27	0.80	0.3
20	90	1.31	1.03	1.89	1.00	0.4	0.16	1.15	0.62	1.00	0.3

* Punto de medición (valor nominal).

Como se puede observar en las Tablas 6 a 10, los valores obtenidos del error normalizado arrojaron resultados que se consideran satisfactorios, según el criterio establecido, para la mayoría de los participantes. Solo uno de los participantes (TH46) obtuvo resultados con error normalizado superior a 1, en los puntos de 50 % HR, 70 % HR y 90 % HR en ambos patrones viajeros (sensor V2310437 con indicador V1710628 y sensor G3120001 con indicador G2930019, respectivamente). En este sentido, se observa que este participante deberá realizar un análisis de sus procedimientos internos para determinar las razones por las cuales sus resultados fueron no satisfactorios; precisamente, este ejercicio de intercomparación representa una herramienta valiosa que ayudará a identificar oportunidades de mejora para este laboratorio.



CONCLUSIONES

Se realizó una comparación interlaboratorio de medidores de humedad relativa en cuatro puntos en el rango de 30 % HR a 90 % HR con temperatura de referencia de 20 °C entre marzo y agosto de 2024, coordinada y pilotada por el CENAMEP AIP en Ciudad de Panamá. Como patrones de transferencia se utilizaron dos higrotermómetros con sensores capacitivos de humedad, cuyas derivas durante el ejercicio se estimaron con cuatro calibraciones realizadas por el técnico encargado de asignar el valor de referencia en el Laboratorio de Humedad Relativa (H0) del CENAMEP AIP.

Los resultados obtenidos en este ejercicio de intercomparación permitieron cumplir con los objetivos propuestos. Se evaluó el grado de equivalencia de las calibraciones de medidores de humedad relativa entre el laboratorio piloto y los tres laboratorios participantes, evidenciando niveles aceptables de compatibilidad en los resultados, conforme al análisis del error normalizado. Este ejercicio proporcionó un recurso valioso para el aseguramiento de la calidad de los resultados emitidos por los participantes, fortaleciendo la confianza en los servicios que ofrecen a sus clientes y demás partes interesadas.

Asimismo, la actividad ofreció una herramienta objetiva para que los participantes demuestren su competencia técnica para calibrar medidores de humedad relativa y continúen desarrollando experiencia en ejercicios de comparación interlaboratorio. Además, el ejercicio también contribuyó al proceso formativo de dos metrólogos del CENAMEP AIP, lo cual representó la finalización de su entrenamiento en el servicio de calibración de medidores de humedad relativa por el método de dos presiones. Este método tiene reconocimiento internacional por su CMC declarada en el BIPM.

Los valores obtenidos de indican que los resultados reportados son consistentes con el valor de referencia, lo que respalda la validez metrológica de los procedimientos aplicados por los participantes. Además, esta metodología de evaluación no solo permite verificar la equivalencia técnica entre laboratorios, sino que también proporciona una herramienta objetiva para identificar posibles desviaciones, evaluar la adecuación de las estimaciones de incertidumbre y contribuir al fortalecimiento de la trazabilidad en las mediciones interlaboratorio.

Los valores de error normalizado se calcularon para 40 mediciones; alrededor del 15 % de estos valores excedieron el valor de 1. Estos resultados corresponden al mismo participante, por lo tanto, se le recomendó con base a su sistema de calidad implementado, realizar un análisis de sus mediciones y establecer acciones que vayan encaminadas a detectar posibles desvíos que originaron que sus resultados no fueran satisfactorios.

Será responsabilidad futura de los laboratorios participantes analizar los resultados obtenidos en esta intercomparación, para evaluar sus procesos y procedimientos de calibración y actualizar sus presupuestos de incertidumbre, cuando corresponda.

Como Centro Nacional de Metrología de Panamá, la realización de estos ejercicios de comparaciones interlaboratorios son una parte integral y permanente de nuestras funciones. Estos ejercicios son fundamentales para mantener la trazabilidad metrológica, evaluar de forma continua la competencia técnica de los laboratorios y detectar oportunamente posibles desviaciones en los procesos de medición. Además, fortalecen la confianza en los resultados emitidos, apoyan la formación del personal técnico y son un componente clave para cumplir con los requisitos de acreditación y

reconocimiento internacional. Su continuidad debe formar parte de la práctica regular de la infraestructura de la calidad, tanto en Panamá como en la región.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a los laboratorios secundarios participantes, en particular a Ángel Escorche de METRICALAB S.A., a Gabriel Parra de P&P Calibration Lab, así como a Ámbar Lorenzo de SIGSA, por su activa participación en este ejercicio y por cumplir en tiempo y forma con las mediciones requeridas para la sistematización y presentación de los resultados de esta comparación.

Se agradece también a todo el personal del CENAMEP AIP en Panamá, por brindar su apoyo en la coordinación y logística, lo que permitió al laboratorio de humedad relativa completar el cronograma establecido y ejecutar las tareas necesarias para la finalización de la comparación interlaboratorio. Asimismo, se reconoce el apoyo del Dr. Jaime Estrella E., Coordinador de I+D+i del CENAMEP AIP, por su valiosa colaboración en la revisión técnica para la publicación de la primera comparación interlaboratorio en humedad relativa en Panamá.

REFERENCIAS

- Bentley, R. E., 1998. *Handbook of temperature measurement. Vol. 1: temperature and humidity measurement*. Berlín: Springer.
- Castro, F.; Tejedor, A.; Prado, E. y Acevedo, H., 2023. Desarrollo del patrón nacional de humedad relativa en el Centro Nacional de Metrología de Panamá. En: *Acta de Artículos del Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología – APANAC 2023* [En línea]. Panamá: APANAC. pp. 342–348. [Consulta: 21 de enero de 2025]. Disponible en: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/apanac/article/view/3967/4512>
- Centro Nacional de Metrología de Panamá (CENAMEP AIP), 2023. *Visión Metrológica Panamá 2050* [En línea]. Panamá: CENAMEP AIP. ISBN 978-9962-8557-0-5. [Consulta: 21 de enero de 2025]. Disponible en: <https://www.cenamep.org.pa/wp-content/uploads/2023/07/LIBRO%20-%20CENAMEP%20-%20PARA%20PLATAFORMA%20DIGITAL.pdf>
- Hardy, B., 1998. ITS-90 formulations for vapor pressure, frost point temperature, dewpoint temperature and enhancement factors in the range -100 to +100 °C. En: *Papers and Abstracts from the Third International Symposium on Humidity and Moisture*, (1), pp. 214–222.
- Hasegawa, S. y Little, J. W., 1977. *The NBS two-pressure humidity generator, mark 2*. En: *Journal of Research of the National Bureau of Standards Section A: Physics and Chemistry*, 81A(1), pp. 1–10.
- International Organization for Standardization, 2017. ISO/IEC 17025:2017. *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración*. Ginebra: ISO.
- International Organization for Standardization, 2023. ISO/IEC 17043:2023. *Evaluación de la conformidad – Requisitos generales para la competencia de los proveedores de ensayos de aptitud*. Ginebra: ISO.



- Joint Committee for Guides in Metrology, 2008. *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections)* [En línea]. Sèvres Cedex: JCGM. [Consulta: 22 de enero de 2025]. Disponible en: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf.
- Joint Committee for Guides in Metrology, 2012. *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)* [En línea]. 3a ed. Sèvres Cedex: JCGM. [Consulta: 22 de enero de 2025]. Disponible en: https://www.bipm.org/documents/20126/41373499/JCGM_200_2012.pdf/f0e1ad45-d337-bbeb-53a6-15fe649d0ff1
- Panamá. Ley No. 52, del 11 de diciembre de 2007. *Gaceta Oficial Digital* [En línea], 19 de diciembre de 2007. [Consulta: 20 de enero de 2025]. Disponible en: <https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/25943/8093.pdf>
- Thunder Scientific Corporation, 2023. *Benchtop two-pressure humidity generator Series 2500 – Operation and maintenance manual* [En línea]. Ed. 25. Albuquerque: Thunder Scientific Corporation. [Consulta: 20 de enero de 2025]. Disponible en: https://www.thunderscientific.com/model_2500/
- Vaisala Oyj, 2007. *Guía del usuario: Medidor portátil de humedad y temperatura HUMICAP de Vaisala HM70* [En línea]. Helsinki: Vaisala. [Consulta: 20 de enero de 2025]. Disponible en: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/HM70%20User's%20Guide%20in%20Spanish.pdf>

Innovación en el tratamiento de residuos peligrosos en Uruguay: estudio experimental de la combustión latente de tierras contaminadas con hidrocarburos

Innovation in hazardous waste treatment in Uruguay:
experimental study of smouldering combustion
of hydrocarbon-contaminated soils

Inovação no tratamento de resíduos perigosos no Uruguai:
estudo experimental da combustão lenta de solos
contaminados por hidrocarbonetos

 **MIRIAN E. CASCO** (1)

 **SANTIAGO LASSUS** (2)

 **MARTÍN TORRES BRUNENGO** (3, 4)

 **ANDRÉS CUÑA** (3, 4)

(1) Grupo de Materiales, Energía y Medioambiente, Departamento de Ingeniería,
Universidad Católica del Uruguay, Montevideo, Uruguay.

(2) Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

(3) Laboratorio de Energías Renovables, Instituto Polo Tecnológico de Pando,
Facultad de Química, Universidad de la República, Pando, Canelones, Uruguay.

(4) Área Fisicoquímica, DETEMA, Facultad de Química, Universidad de la República,
Montevideo, Uruguay

RECIBIDO: 6/6/2025 → APROBADO: 7/11/2025  mtobru@fq.edu.uy

RESUMEN

Este trabajo presenta el estudio experimental de la combustión latente (CL) aplicada al tratamiento de tierras contaminadas con hidrocarburos. Se empleó un reactor de CL a escala de laboratorio. Se evaluaron cuatro mezclas con diferentes proporciones de combustible auxiliar, analizando la autosostenibilidad del proceso, la remoción de hidrocarburos y el costo energético asociado. El residuo se caracterizó mediante análisis elemental, análisis próximo, termogravimetría y determinación del poder calorífico. Los resultados evidenciaron la necesidad de utilizar un combustible auxiliar para iniciar la reacción de CL. Para esto, se seleccionó aserrín de abeto y se prepararon cuatro mezclas con arena y tierra contaminada (M1, M2, M3 y M4) para evaluar su influencia en la autosostenibilidad del proceso. Los resultados indican que la M4, conteniendo un 10 %

de aserrín y 90 % de tierra contaminada permitió mantener la CL, logrando una remoción del 95,23 % de los hidrocarburos. Adicionalmente, el análisis de costos estimó un valor de 0,3224 USD/kg de residuo tratado, destacando la viabilidad económica de la tecnología y ampliando las opciones de disposición final del residuo. La implementación de CL en Uruguay representa una alternativa eficiente y accesible para la gestión de residuos peligrosos, reduciendo la dependencia de métodos convencionales y promoviendo soluciones innovadoras.

Palabras clave: remediación ambiental, tecnología sostenible, proceso de baja energía, material peligroso, valorización.

ABSTRACT

This study presents the experimental investigation of self-sustained smouldering (SSS) applied to the treatment of hydrocarbon-contaminated soils. A laboratory-scale smouldering reactor was employed. Four mixtures with different proportions of auxiliary fuel were evaluated, analysing the self-sustainability of the process, hydrocarbon removal, and the associated energy cost. The residue was characterised through elemental analysis, proximate analysis, thermogravimetry, and determination of the calorific value. The results demonstrated the need for an auxiliary fuel to initiate the SSS reaction. Spruce sawdust was selected for this purpose, and four mixtures containing sand and contaminated soil (M1, M2, M3, and M4) were prepared to assess their influence on process self-sustainability. The results indicate that mixture M4, containing 10 % sawdust and 90 % contaminated soil, is SSS and achieved a 95.23 % hydrocarbon removal. Additionally, the cost analysis estimated a value of 0.3224 USD/kg of treated residue, highlighting the economic viability of the technology and broadening the available options for final waste disposal. The implementation of smouldering combustion in Uruguay represents an efficient and accessible alternative for the management of hazardous waste, reducing dependence on conventional methods and promoting innovative solutions.

Keywords: environmental remediation, sustainable technology, low-energy process, hazardous material, valorization.

RESUMO

Este estudo apresenta a investigação experimental da combustão latente (CL) aplicada ao tratamento de solos contaminados por hidrocarbonetos. Utilizou-se um reator de CL em escala de laboratório. Foram avaliadas quatro misturas com diferentes proporções de combustível auxiliar, analisando a autossustentabilidade do processo, a remoção de hidrocarbonetos e o custo energético associado. O resíduo foi caracterizado por meio de análise elementar, análise imediata, termogravimetria e determinação do poder calorífico. Os resultados demonstraram a necessidade de utilizar um combustível auxiliar para iniciar a reação de CL. Para isso, selecionou-se serragem de abeto e prepararam-se quatro misturas com areia e solo contaminado (M1, M2, M3 e M4) para avaliar sua influência na autossustentabilidade do processo. Os resultados indicam que a mistura M4, contendo 10 %

de serragem e 90 % de solo contaminado, permitiu manter a CL, alcançando uma remoção de 95,23 % dos hidrocarbonetos. Adicionalmente, a análise de custos estimou um valor de 0,3224 USD/kg de resíduo tratado, destacando a viabilidade econômica da tecnologia e ampliando as opções de disposição final do resíduo. A implementação da CL no Uruguai representa uma alternativa eficiente e acessível para a gestão de resíduos perigosos, reduzindo a dependência de métodos convencionais e promovendo soluções inovadoras.

Palavras-chave: remediação ambiental, tecnologia sustentável, processo de baixa energia, material perigoso, valorização.

INTRODUCCIÓN

La CL se define como una reacción exotérmica, de baja temperatura y sin llama que se propaga lentamente a través de un combustible poroso o un combustible esparcido en un medio poroso inerte (Rein et al., 2007) (Torero et al., 2020). Este fenómeno se encuentra presente en todo tipo de incendios (forestales, residenciales, industriales), motivo por el cual se ha convertido en un tema de estudio en el contexto de prevención de incendios (Santoso et al., 2019). Sin embargo, en los últimos años ha surgido una nueva tecnología basada en la CL como una alternativa económica y eficiente para el tratamiento de residuos (Fu et al., 2024), superando a métodos convencionales como el relleno sanitario, la disposición en tierra o la incineración, entre otros. Los métodos convencionales no pueden tratar residuos de elevada humedad ya que implica un alto consumo energético para su secado si se quieren incinerar o requiere la necesidad de grandes extensiones de terreno para su disposición final. Adicionalmente, se suma el problema logístico de mover grandes volúmenes de residuos. Si este es considerado peligroso, la gestión y disposición conlleva costos significativamente más elevados.

Para aplicar la CL a residuos de manera efectiva y que además sea atractiva desde un punto de vista energético, es clave que el proceso alcance condiciones de autosostenibilidad. Esto quiere decir que la fuente de energía externa solo se requiere para la etapa de calentamiento de combustible hasta una cierta temperatura donde los procesos de devolatilización comienzan a ocurrir. Una vez que se enciende, la energía almacenada en el residuo a tratar debe ser suficiente para generar el calor necesario para las reacciones posteriores (evaporación de agua y pirólisis) (Torero et al., 2020). Un medio poroso inerte para proporcionar permeabilidad, suficiente superficie de reacción y favorecer la transferencia de calor, es un punto clave ya que permite la ignición progresiva de las áreas adyacentes, asegurando así una reacción autosostenida hasta eliminar todo el combustible disponible (Rashwan et al., 2016). Si la permeabilidad y/o la energía disponible no es suficiente y/o la transferencia de calor no es efectiva, la combustión latente se extinguirá y la propagación cesará.

Los estudios donde la CL ha sido aplicada han demostrado resultados prometedores en el tratamiento de diversos tipos de residuos de alto contenido de humedad y/o bajo poder calorífico, como lodos de plantas de tratamiento de agua (Shen et al., 2025), (Rashwan et al., 2016), heces (Yermán et al., 2017a) y residuos orgánicos en general, incluyendo la fracción orgánica de los residuos municipales y residuos agroindustriales (Shen et al., 2025), (Song et al., 2022). También ha sido efectiva para

tratar suelos contaminados con compuestos orgánicos persistentes de fase no-acuosos, como alquitrán y petróleo crudo (Switzer et al., 2014; Pironi et al., 2011). Asimismo, un trabajo reciente publicado por Torres Burrengo et al. (2006) evaluó el uso de lutitas pirobituminosas nacionales (también conocidas como esquistos bituminosos), cuyas características fisicoquímicas se asemejan a suelos contaminados por hidrocarburos. En este trabajo se demostró que el uso de combustible auxiliar mejora el proceso de CL, permitiendo una quema autosostenida de las lutitas pirobituminosas mediante la introducción de biomasa como combustible auxiliar.

Las tierras contaminadas por hidrocarburos representan un grave riesgo para los ecosistemas y la salud humana debido a la persistencia y toxicidad de estos compuestos. La presencia de hidrocarburos, como los derivados del petróleo, altera la estructura del suelo, reduce su fertilidad y afecta la biodiversidad al inhibir el crecimiento de plantas y microorganismos esenciales para el equilibrio ecológico. Además, estos contaminantes pueden infiltrarse en acuíferos, comprometiendo la calidad del agua y generando riesgos de exposición crónica para las poblaciones cercanas. La degradación de estos compuestos es lenta y costosa, lo que agrava su peligrosidad a largo plazo. Por ello, la remediación de estas áreas se ha convertido en una prioridad ambiental, requiriendo enfoques multidisciplinarios para mitigar sus impactos y restaurar la funcionalidad de los suelos afectados (Kuppusamy et al., 2016; Pinedo et al., 2013). A diferencia de métodos tradicionales, la CL minimiza la liberación de emisiones tóxicas y reduce el tiempo de tratamiento, ofreciendo una alternativa eficiente y sostenible para la recuperación de áreas degradadas (Yermán, 2016).

Como combustible auxiliar se empleó aserrín procedente de tablas de *Abies alba* (abeto blanco), obtenidas en una carpintería local de Montevideo (Uruguay). Su selección respondió a su disponibilidad inmediata en el sitio de trabajo y a su composición lignocelulósica homogénea, la cual favorece una ignición rápida y un aporte térmico estable durante la etapa inicial de la combustión. El aserrín de abeto presenta además bajos contenidos de humedad y de cenizas, propiedades adecuadas para su uso como material auxiliar en la conformación del frente de combustión. Desde el punto de vista fisicoquímico, las características reportadas para *A. alba* son comparables a las de especies de coníferas ampliamente disponibles en Uruguay, como el pino, particularmente en términos de su fracción volátil, poder calorífico y composición lignocelulósica (Curto et al., 2017). Por tanto, aunque el abeto no constituye uno de los residuos de biomasa de mayor volumen en el país, su comportamiento térmico puede considerarse representativo de biomasa residual de origen maderero utilizada como combustible auxiliar. Finalmente, el empleo de diferentes residuos lignocelulósicos para evaluar su desempeño como materiales auxiliares se alinea con las líneas de acción del Plan Nacional de Gestión de Residuos, que promueve la valorización de flujos de biomasa con potencial energético.

En este trabajo se reporta el primer reactor de CL diseñado en Uruguay a escala laboratorio para tratar tierras contaminadas con hidrocarburos, a la cual se le introdujo aserrín de madera de abeto para mejorar el proceso de combustión de la materia orgánica. El reactor de CL se encuentra instalado y operativo en el Instituto Polo Tecnológico de Pando, Área de Energías Renovables.

Las tierras contaminadas tratadas en este trabajo son representativas de los residuos que pueden generarse durante operaciones de transporte y manejo de hidrocarburos. En Uruguay, por ejemplo, se han reportado derrames de crudo de varios miles de litros, como el evento ocurrido en las inmediaciones de la zona de la boyera petrolera de José Ignacio en 2018 (aprox. 5800 L), que requirió la remoción y gestión de suelos contaminados. Estos antecedentes permiten dimensionar la relevancia de contar con alternativas de tratamiento accesibles y eficientes para este tipo de residuos.

De acuerdo con consultas públicas a empresas que gestionan este tipo de residuo, se estima que su disposición conlleva un costo de ~ 45 \$UYU/kg, ya que se considera dentro de la Categoría I de los residuos sólidos industriales según el Decreto N.º 182/013 (Uruguay, 2013). Es importante destacar que la ocurrencia de derrames no se limita a esta industria, sino que también es frecuente en parques eólicos, por ejemplo, el mayor impacto ambiental luego de la mortandad de aves es causado por los derrames de aceites y lubricantes en el suelo (Uruguay. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, 2015). En este sentido, el campo de aplicación de la CL en el país es muy amplio e incluso está muy distribuido a lo largo del territorio nacional solo teniendo en cuenta la industria energética.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es el estudio experimental de la CL de tierras contaminadas con hidrocarburos utilizando un reactor de escala de laboratorio, como alternativa de tratamiento de residuos peligrosos. Se busca evaluar las condiciones de operación del reactor para que la reacción sea autosostenida mediante la incorporación de biomasa con el fin de mejorar las condiciones de la autosostenibilidad y que se logre remover el contaminante y, de esta manera, ampliar las posibilidades de su disposición final. Adicionalmente, se realiza un análisis básico del costo del tratamiento por Kg de residuo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de materiales y acondicionamiento

La tierra contaminada fue suministrada por el Laboratorio de Medio Ambiente (LAMA) de la Administración Nacional de Combustible, Alcohol y Portland de Uruguay (ANCAP). Esta procede de la remoción de tierra posterior al derrame de crudo ocurrido en diciembre de 2019, en la planta intermedia del oleoducto entre José Ignacio y La Teja. Las muestras recibieron un tratamiento de desgranado y homogeneización previo a ser analizadas y tratadas en el reactor.

La arena utilizada para realizar las mezclas fue adquirida en Gianni (arena para filtro de piscina) con un tamaño de grano entre 1.5 y 3 mm, y una humedad relativa de 0,3 %.

El aserrín de madera de abeto, seleccionado como combustible auxiliar, fue suministrado por un aserradero de la ciudad de Montevideo, y fue usado en las condiciones en las cuales fue suministrado.

Análisis próximo

El análisis próximo para determinación de volátiles, carbono fijo y cenizas se realizó en las condiciones establecidas por las normas ISO 562 (International Organization for Standardization, 2010), indicadas para el estudio de combustibles sólidos tipo carbón, madera y biomasa. La densidad aparente fue calculada mediante el cociente entre una masa de muestra determinada mediante balanza analítica, y el volumen ocupado por la muestra determinado con bureta graduada.

Análisis termogravimétrico (TGA)

Los experimentos de análisis termogravimétrico de los materiales de partida fueron realizados en atmósfera oxidante (aire) y en atmósfera inerte (nitrógeno) con un flujo de 50 mL min⁻¹, utilizando un equipo marca Shimadzu, modelo TGA-50. El rango de temperatura estudiado fue desde temperatura ambiente hasta los 900 °C, utilizando una velocidad de calentamiento de 20 °C min⁻¹ y empleando cápsulas de platino.

Análisis elemental

El análisis elemental (C, H, N, y S) se realizó mediante un analizador CHNS/O Thermo Scientific FLASH 2000. Se colocaron muestras de aproximadamente 2-3 mg en cápsulas, las cuales se introdujeron en el autosampler Thermo Scientific MAS 200R, que a su vez alimentó un reactor de oxidación/reducción mantenida a una temperatura de 900-1000 °C con un tiempo de residencia de 1 minuto. A alta temperatura, se produce una reacción exotérmica entre el oxígeno suministrado y la cápsula de estaño, lo que provoca un aumento de la temperatura hasta 1800 °C durante unos segundos. A esta temperatura, tanto las sustancias orgánicas como las inorgánicas se convierten en gases elementales, que son separados por cromatografía después de la reducción, a un flujo de 130 cm³/min utilizando helio de alta pureza como gas portador. Luego, la composición del gas se determina mediante un detector de conductividad térmica (TCD) de alta sensibilidad.

Cuantificación del poder calorífico

El poder calorífico superior (PCS) fue medido utilizando una bomba calorimétrica modelo Parr 1341, equipada con un termómetro de precisión 6672. La determinación se realizó utilizando 0,5 g de muestra. Para cada medición se aplicó la corrección por el calor de formación de ácido de acuerdo con el manual de la bomba calorimétrica. El Poder Calorífico Inferior (PCI) se calculó a partir del PCS y los resultados del análisis elemental.

Mezclas a tratar en el reactor

En base a los resultados de los análisis fisicoquímicos de las tierras contaminadas y del aserrín de madera de abeto (a partir de ahora combustible auxiliar), se prepararon cuatro mezclas (M1, M2, M3 y M4) para tratar en el reactor de CL cuyos porcentajes de composición (combustible auxiliar, arena, tierra contaminada) se resumen en la Tabla 1.



Cabe destacar que la arena no aporta poder calorífico, pero agrega porosidad y firmeza a la mezcla, que permite un flujo homogéneo de aire a través del cuerpo de reactor. Para corroborar si la tierra puede funcionar por sí sola como medio poroso se decide preparar una muestra (M4) sin contenido de arena.

TABLA 1. Porcentaje de los componentes de las mezclas tratadas en el reactor de CL.

Mezcla	Combustible auxiliar (%)	Arena (%)	Tierra Contaminada (%)	Humedad Ponderada (%)
M1	10	90	0	1,37
M2	10	45	45	9,34
M3	10	22,5	67,5	13,32
M4	10	0	90	17,30

Cuantificación de materia orgánica extraíble

El contenido de material extraíble con n-hexano fue determinado siguiendo el protocolo establecido en el Método EPA 9071B: Material Extraíble con n-Hexano (HEM) para Lodos, Sedimentos y Muestras Sólidas (United States Environmental Protection Agency, 1998).

Paralelamente, el contenido de materia seca se cuantificó mediante secado en una balanza de secado, siguiendo procedimientos estandarizados. Ambos análisis se llevaron a cabo para la tarrina de tierra contaminada aportada por ANCAP (donde se saca la tierra para preparar las muestras a utilizar en el reactor), como en los restos de material que quedan dentro del reactor después de realizar el tratamiento de CL, con el fin de evaluar los cambios en la cantidad de materia orgánica extraíble de las muestras tras el proceso térmico y corroborar su eficacia.

Esquema del reactor y procedimiento experimental

En la Figura 1 se presenta el esquema del reactor utilizado para llevar a cabo las experiencias. El cilindro central tiene una altura de 120 cm y un diámetro interno de 10 cm, recubierto en su superficie lateral con un aislante de lana de roca para minimizar las pérdidas de calor hacia el entorno. En la base del reactor se encuentra un difusor de aire, compuesto por una pequeña tobera invertida, cubierto con grava gruesa. Sobre esta capa se dispone la resistencia, la cual se recubre con grava fina (arena), la cual no solo protege a la resistencia de una posible combustión con llama, sino que también asegura una distribución homogénea del aire hacia el cuerpo central del reactor, donde se coloca la mezcla a tratar. El aire se inyecta mediante un compresor marca Goldex de 100 L de capacidad, y el flujo se regula con un controlador marca SMC, modelo PFM750S. La resistencia es del tipo blindada CoilHeater y está controlada por un dispositivo marca Autonics, modelo TCNS. Para monitorear la temperatura, se instalaron diez termocuplas (TC1-TC10), centradas y distribuidas uniformemente a intervalos de 5 cm a lo largo del cuerpo del reactor. La TC1 es la más cercana a la resistencia, sumergida en arena,



mientras que la TC10 es la más alejada. Los datos de temperatura fueron registrados con un datalogger marca Applent, modelo AT4516.

Una vez colocada la línea de termocuplas centrada en el reactor, la muestra ensayada se introdujo por la parte superior del reactor empleando una cuchara, y rellenando hasta una altura de 60 cm. Posteriormente, se cubrió con arena limpia la parte superior con fines de aislamiento.

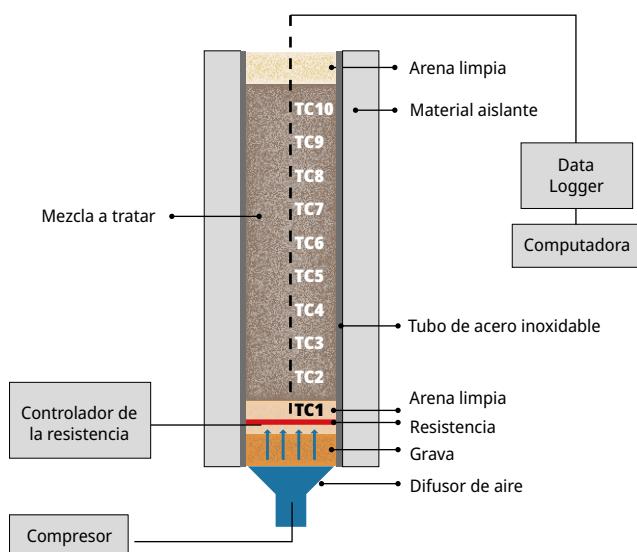


FIGURA 1. Esquema de la configuración del reactor y sus principales componentes.

Colocada la muestra y en condiciones de comenzar el experimento, se realizó un precalentamiento inicial con la resistencia eléctrica seteada a 450 °C y un flujo de aire a la entrada de 5 L/min. Una vez que la TC2 alcanzó los 250 °C (valor de ignición que indica la termogravimetría para el combustible auxiliar), se incrementó el flujo de aire a 30 L/min. Posteriormente, cuando la TC3 alcanzó su temperatura máxima se apagó la resistencia para observar si el resto de las termocuplas registraban un aumento progresivo de la temperatura. Los datos de temperatura recabados mediante las termocuplas se registraron en un gráfico temperatura en función del tiempo, brindando información para determinar si efectivamente la combustión se había propagado a lo largo del cuerpo del reactor de manera autosostenible. La velocidad de CL se calcula a partir del intervalo de tiempo correspondiente a la pendiente más pronunciada en el registro de temperatura de dos termopares consecutivos (esto se obtiene a partir del grafico de temperatura vs tiempo) y de la distancia entre los termopares correspondientes, lo cual es conocido desde el momento que se ubican los termopares en el reactor. Existen muchos métodos diferentes para determinar la velocidad de CL, pero se ha comprobado que este método es el más robusto (Yermán, et al., 2017b).

Estimación del costo del proceso consumo

La estimación de costo del proceso se cuantificó teniendo en cuenta únicamente el consumo de energía eléctrica debido a la resistencia del rector, lo consumido por el compresor de aire y lo consumido por diferentes componentes electrónicos. Para cuantificar la energía eléctrica consumida por la resistencia y el compresor en los experimentos, se instalaron dos medidores comerciales de energía consumida (con una apreciación de 0.1 kWh), uno a la entrada del compresor y otro a la de la resistencia. Se registran los valores antes y después de cada experimento. Durante la preparación de las muestras se utilizó una mezcladora cuyo gasto energético fue menor a la precisión del medidor (0.1 kW), por lo que se despreció en el cálculo final. Adicionalmente se tomaron como valores de consumo de la PC de escritorio (HP), monitor (LG) y datalogger como 180, 41 y 10 W, respectivamente. Finalmente, se contabilizaron las horas de duración de cada experimento y se calculó el gasto energético en kWh. Para el cálculo del consumo en pesos uruguayanos se tomó el pliego tarifario de UTE (Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas) en el momento de realización de los experimentos, conociendo que el Polo tecnológico de Pando tiene un contrato eléctrico como mediano consumidor, y considerando el mayor costo posible (funcionamiento en horario de punta, en tarifa MC1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se muestran en la Tabla 2 indican que para el residuo tratado en este trabajo el contenido de hidrocarburos es suficiente para ser considerado un residuo industrial peligroso en Uruguay (Categoría I, de acuerdo con el Decreto 182/013) (Uruguay, 2013), pero es bajo para lograr la ignición y consiguiente propagación de la combustión dado que no fue posible la determinación de su poder calorífico. El análisis fisicoquímico (Tabla 2) confirma un bajo contenido en carbono y un elevado contenido en cenizas (compuestos inorgánicos con nulo poder calorífico). Estos resultados anticipan que, por sí sola, esta tierra contaminada no puede ser tratada en un reactor de CL. Para mitigar este hecho, la estrategia es seleccionar un combustible auxiliar.

Por otro lado, el aserrín de madera de abeto es una biomasa residual que se genera en abundancia en Uruguay, contiene bajo contenido en cenizas y un elevado poder calorífico (Tabla 2), por lo que se considera una excelente opción para mezclar con las tierras contaminadas y aportar la energía necesaria para que ocurra la ignición y propagación de la combustión.



TABLA 2. Características fisicoquímicas de las tierras contaminadas y del aserrín de madera de abeto.

Análisis Elemental (% en masa)*				Análisis Próximo (% en masa, base seca)**			Contenido de Humedad (%)**	Densidad aparente (g/cm³)	Poder Calorífico superior/ inferior (MJ/kg base seca)***
C	H	O	N	Volátiles	Carbono Fijo	Cenizas			
Aserrín de madera de Abeto									
50,41	6,82	42,14	0,14	85,83	13,68	0,49	11,02	0,51	19,85/18,34
Tierras contaminadas									
1,81	0,85	27,11	0,19	24,41	4,55	70,04	18,00	1,43	-

*incertidumbres estimadas en 1 % de la medida

** Incertidumbres estimadas en 5 % de la medida

*** Incertidumbre estimada em ± 0.20 MJ/kg

Los resultados de TGA de la tierra contaminada, realizada en atmósfera oxidante e inerte (Figura 2), son muy similares. En ambos casos, se observa únicamente una pérdida de masa en torno a los 100 °C, atribuida al contenido de humedad, sin que se detecte de manera evidente el pico correspondiente a la pirólisis o combustión de los hidrocarburos. Este resultado confirma la necesidad de emplear un combustible auxiliar. Por otro lado, el TGA del aserrín de madera de abeto, realizada en atmósfera oxidante e inerte (Figura 2), revela varias etapas de pérdida de masa. En ambas condiciones se observa una primera pérdida alrededor de los 100 °C, atribuida a la evaporación de la humedad. En atmósfera oxidante se observa un pico de pérdida de volátiles y combustión entre 250 y 350 °C, seguido de un tercer pico menor entre 325 y 470 °C. Por otro lado, en atmósfera inerte se registra una segunda pérdida de masa entre 250 y 380 °C, correspondiente a la descomposición térmica de los compuestos volátiles, asociada a los procesos de torrefacción y pirólisis de la hemicelulosa y la celulosa, representando aproximadamente el 70 % de la masa. Por otro lado, tomando en cuenta estos resultados, se selecciona la temperatura de 250 °C como la mínima temperatura a la cual se considera el inicio de ignición de la CL en el reactor.

Cabe destacar que la presencia de humedad en el residuo y en el aserrín no implica un problema, ya que se ha demostrado en la literatura que la tecnología de CL puede tratar residuos de hasta 80 % de humedad bajo las condiciones operativas adecuadas (Rashwan et al., 2016) (Shen et al., 2025). El desafío y la utilidad para la aplicación industrial es que la CL sea autosostenible. Esta condición se logra cuando la generación y retención de calor en el cuerpo del reactor supera las pérdidas de calor con el medio circundante y en procesos endotérmicos como por ejemplo la pirólisis y la evaporación de agua (Fu et al., 2024) (Rashwan et al., 2016).



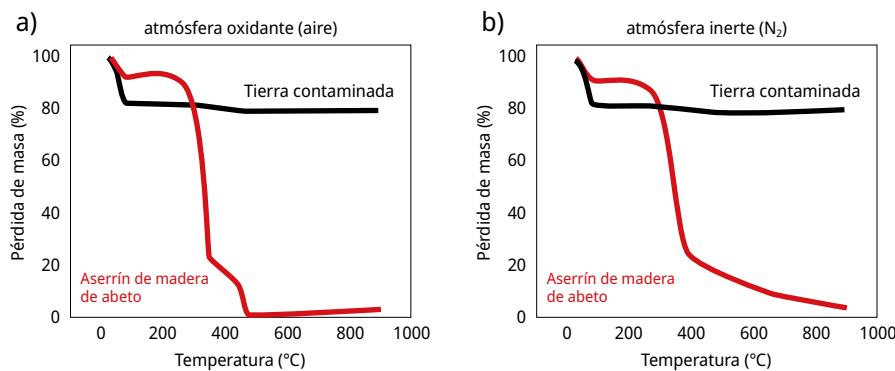


FIGURA 2. Termogravimetría de la tierra contaminada y el aserrín de madera de abeto en (a) atmósfera oxidante (aire) y (b) atmósfera inerte (nitrógeno).

La Figura 3 muestra los resultados para las cuatro mezclas tratadas en el reactor de CL. Se observa que al aumentar el contenido de tierra contaminada en la mezcla el tiempo en que tarda TC2 en llegar a 250 °C es mayor (130, 210, 300 y 340 min). Este comportamiento es directamente proporcional ($R^2 = 0.973$) al contenido de humedad de la mezcla (Tabla 1), la cual consume energía de evaporación. Evidencia de este hecho es el plateo a 100 °C al que llegan el resto de las termocuplas.

La evolución temporal del pico máximo de temperatura a lo largo del reactor, una vez que se dejó de suministrar energía térmica a través de la resistencia eléctrica, es uno de los indicadores respecto a si la CL está ocurriendo en forma autosostenible. Según se puede observar en las curvas de temperatura vs. tiempo (ver Figura 3), la temperatura máxima dentro del reactor se desplaza a lo largo del reactor manteniendo su valor acotado al rango de entre 750 y 1000 °C, lo cual confirma la autosostenibilidad del proceso de CL. Se ha observado que, para condiciones de combustión autosostenible, las temperaturas en el pico de ignición en el alquitrán y el petróleo crudo son superiores a 700 °C y 550 °C, respectivamente (Shen et al., 2025), (Pironi et al., 2011).

Además, una temperatura del pico de ignición superior a 500 °C es suficiente para asegurar que el frente de evaporación del agua se propague antes que el frente de combustión, manteniendo así reacciones autosostenibles, siempre y cuando el suministro de aire y la permeabilidad del medio sean los adecuados para la mezcla a tratar. Por otro lado, se ha observado que la CL no es autosostenible en ventanas de picos de temperaturas entre 250 °C a 400 °C (Shen et al., 2025), (Pironi et al., 2011). Y picos superiores a 1000 °C podrían indicar la transición de CL a combustión con llama (Wyn et al., 2020).

La Figura 3 muestra que para las mezclas M1, M2, M3 y M4, respectivamente, la mayoría de las termocuplas a lo largo del reactor registraron picos de temperatura que se mantuvieron, luego de apagada la resistencia, entre 500 y 1000 °C, y en ausencia de llama. Este comportamiento es un fuerte indicio de que la reacción de CL fue autosostenible a lo largo del reactor. Este hecho se corroboró mediante el análisis de las cenizas finales, en el cual se observó una disminución significativa del material extraíble con n-hexano, indicando la destrucción de la mayor parte de los hidrocarburos presentes. Adicionalmente, conociendo la posición de las termocuplas y el tiempo en que aparecen

los picos máximos de temperatura, se puede calcular la velocidad de propagación de la CL para las cuatro mezclas. Las mismas fueron de 0,387 cm/min (M1), 0,341 cm/min (M2), 0,372 cm/min (M3) y 0,194 cm/min (M4), las cuales fueron calculadas de acuerdo a la metodología empleada por Yermán et al. (Yermán et al., 2017b). Para la experiencia M4 la velocidad fue claramente menor, lo que indica que el lecho de reacción, en ausencia de arena, es más compacto provocando que el flujo de aire, la transferencia de calor, y, por tanto, el frente de reacción avance más lento que en los casos que contienen arena (Yermán et al., 2017a). Aun así, la historia de las termocuplas da indicio de que la reacción fue autosostenible, es decir, que para tratar las tierras contaminadas la arena no es necesaria para aumentar la porosidad del lecho de reacción y la tierra efectivamente actúa como medio inerte de propagación del frente de reacción.

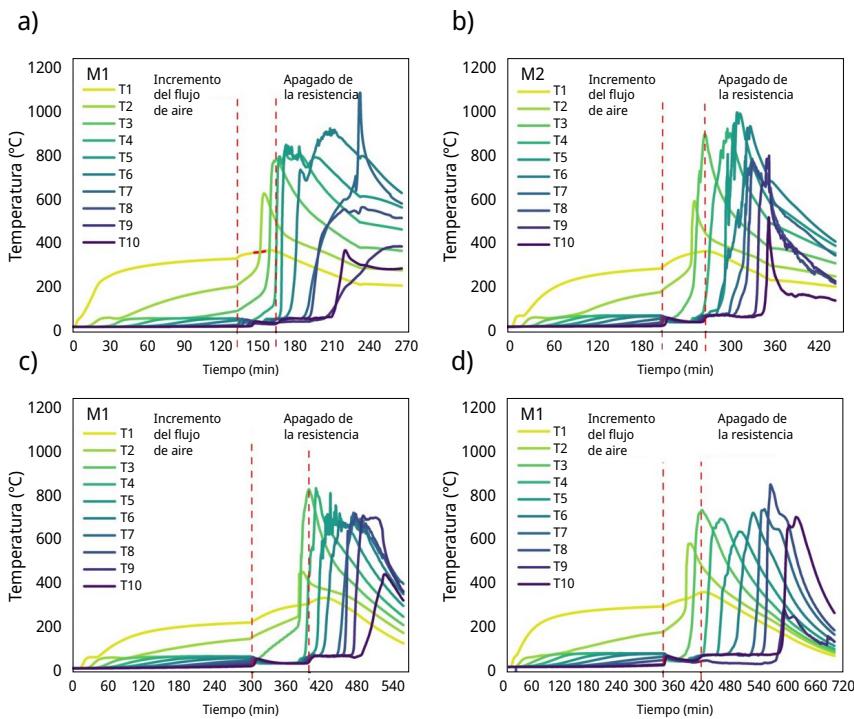


FIGURA 3. Perfil de la evolución de la temperatura con el tiempo a lo largo del eje central del cuerpo del reactor para: (a) M1, (b) M2, (c) M3 y (d) M4. Flujo de aire inicial de 5 L/min e incremento a 30 L/min.

Análisis de la tierra contaminada postratamiento

Del conjunto de mezclas estudiadas, únicamente se analizó el contenido de hidrocarburos presentes en las cenizas postratamiento de la mezcla M4. Aunque la mezcla M4 contiene un 10 % de combustible auxiliar, se destaca como la opción más adecuada entre las formulaciones estudiadas, ya que la historia de las termocuplas indica que la CL cumple con las condiciones de autosostenibilidad y además, según se verá en el análisis de costos que se discute más adelante, esta mezcla resulta la alternativa más económica

prescindiendo el uso de arena. Los resultados muestran que, efectivamente, es posible eliminar hasta el 95,23 % del material extraíble con n-hexano (Tabla 3), lo que constituye un avance prometedor, ya que elimina la característica combustible del residuo (Categoría I, según el Decreto 182/013) (Uruguay, 2013), ampliando así las opciones para su disposición final. Si bien en Uruguay no existe un límite específico de hidrocarburos fijado por normativa, actualmente estos residuos suelen ser enviados a la Cámara de Industrias del Uruguay o dispuestos en el relleno sanitario de la Intendencia de Montevideo, según las características del derrame.

TABLA 3. Determinación de material extraíble con n-hexano (HEM-SOL) de las tierras contaminadas antes y después del tratamiento en el reactor de CL (M4).

Tierra contaminada con hidrocarburos	HEM-SOL mg/Kg (b.s.)*	Materia seca, %m/m (b.h.)*
Sin tratar	3800	82,5
Tratada	181	99,5

*Incertidumbres estimadas en 15 % de la medida

Por último, es importante calcular el gasto energético del tratamiento debido al uso de la resistencia y compresor de aire. La resistencia brinda la energía inicial para la ignición y el compresor suministra el flujo de aire a lo largo de todo el experimento. Los resultados para las cuatro mezclas se resumen en la Tabla 4.

TABLA 4. Consumo energético de las mezclas tratadas en el reactor de CL.

Mezcla	Consumo energético (KWh)	Costo (pesos uruguayos)	Costo (USD)*
M1	1,42	16,4	0,3845
M2	2,07	23,9	0,5604
M3	3,48	40,1	0,9402
M4	4,30	49,5	1,1606

*cambio 42,65000 pesos uruguayos/USD, valor de venta 05/06/2025 cotización Banco de la República Oriental del Uruguay.

El gasto energético total del experimento M4 (3,6 Kg de tierra contaminada) fue de 4,30 kWh, que implica un costo energético total de 49,5 \$, es decir 13,75 \$/Kg (0,32239 USD/Kg) de tierra contaminada. A modo de referencia, el tratamiento convencional de tierras contaminadas con hidrocarburos mediante disposición final suele implicar costos en el orden de 45 \$/Kg, debido a los requerimientos de transporte, acondicionamiento y manejo especializado del material. En comparación, el costo estimado para el proceso de CL evaluado en este trabajo es considerablemente menor. Esto sugiere que la CL constituye una alternativa económicamente competitiva, con la



ventaja adicional de reducir el contenido de hidrocarburos del residuo y, en consecuencia, ampliar sus opciones de disposición final.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que se logró construir un reactor de CL adecuado y de fácil operación para experimentos a escala de laboratorio. Este reactor, el primero en Uruguay, permite tratar tierras contaminadas con hidrocarburos sin la necesidad de añadir arena. La adición de aserrín de madera de abeto como combustible auxiliar fue indispensable para iniciar la reacción. La mezcla M4 (10 % combustible auxiliar / 90 % tierras contaminadas) alcanzó las condiciones de autosostenibilidad del proceso, logrando una remoción de los extraíbles por n-hexano (indicador de contenido de hidrocarburos) del 95,23 %. Si bien la normativa uruguaya no establece límites específicos, el contenido final obtenido es suficientemente bajo como para permitir la reutilización del material tratado en el sitio.

Estos resultados confirman que la CL es un método eficaz y de bajo costo energético, y abre nuevas oportunidades para la innovación en el tratamiento de residuos peligrosos en Uruguay. No obstante, se reconoce que este estudio se realizó sobre un tipo específico de suelo (suelo orgánico) y un hidrocarburo particular (petróleo). Por ello, futuras investigaciones deberían ampliar la exploración a diferentes texturas y composiciones de suelo, así como a otros tipos de hidrocarburos, con el fin de evaluar la robustez del proceso y su aplicabilidad en un rango más amplio de escenarios reales.

AGRADECIMIENTOS

Santiago Lassus, Mirian E. Casco y Andrés Cuña agradecen a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) por la financiación de la maestría (POS_NAC_M_2020_1_164356). Los autores agradecen al Laboratorio de Medio Ambiente (LAMA) de ANCAP por el suministro de las muestras y la medida de los extraíbles por n-hexano.

REFERENCIAS

- Curto, P.; Pena, G.; Mantero, C.; Siri, G.; Tancredi, N.; Amaya, A.; Durante, A.; Ibañez, A.; Federico, E.; Lidio Braga, E. y Flores, M., 2017. *Cuantificación y evaluación del potencial energético de residuos agrarios y agroindustriales no tradicionales*. Montevideo: Udelar.
- Fu, J.; Zhang, S.; Ji, L.; Xu, X.; Jiao, W.; Chen, T.; Li, X. y Zhan, M., 2024. State of the art in self-sustaining smoldering for remediation of contaminated soil and disposal of organic waste. En: *Journal of Hazardous Materials*, 474, 134667. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134667>
- International Organization for Standardization, 2010. ISO 562/2010(E): *Hard coal and coke - Determination of volatile matter*. - Ginebra: ISO.

- Kuppusamy, S.; Palanisami, T.; Megharaj, M.; Venkateswarlu, K. y Naidu, R., 2016. Ex-Situ remediation technologies for environmental pollutants: a critical perspective. En: *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 236, pp. 117–192. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-20013-2_2
- Pinedo, J.; Ibáñez, R.; Lijzen, J. P. A. e Irabien, Á., 2013. Assessment of soil pollution based on total petroleum hydrocarbons and individual oil substances. En: *Journal of Environmental Management*, 130, pp. 72–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.048>
- Pironi, P.; Switzer, C.; Gerhard, J. I.; Rein, G. y Torero, J. L., 2011. Self-sustaining smoldering combustion for NAPL remediation: Laboratory evaluation of process sensitivity to key parameters. En: *Environmental Science and Technology*, 45(7), pp. 2980–2986. DOI: <https://doi.org/10.1021/ES102969Z>
- Rashwan, T. L.; Gerhard, J. I. y Grant, G. P., 2016. Application of self-sustaining smouldering combustion for the destruction of wastewater biosolids. En: *Waste Management*, 50, pp. 201–212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.037>
- Rein, G.; Fernandez-Pello, A. C. y Urban, D. L., 2007. Computational model of forward and opposed smoldering combustion in microgravity. En: *Proceedings of the Combustion Institute*, 31(2), pp. 2677–2684. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.08.047>
- Santoso, M. A.; Christensen, E. G.; Yang, J. y Rein, G., 2019. Review of the transition from smouldering to flaming combustion in wildfires. En: *Frontiers in Mechanical Engineering*, 5, 456580. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmech.2019.00049>
- Shen, X.; Yan, H.; Shi, J.; Tan, Y.; Yang, H.; Hu, H. y Li, S., 2025. Experimental investigation on smoldering combustion for sewage sludge treatment: Influence of key parameters and self-sustaining limit. En: *Case Studies in Thermal Engineering*, 65, 105673. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105673>
- Song, Z.; He, T.; Li, M.; Wu, D. y You, F., 2022. Self-sustaining smoldering as a novel disposal approach for food waste with high moisture content. En: *Fuel Processing Technology*, 228, 107144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.107144>
- Switzer, C.; Pironi, P.; Gerhard, J. I.; Rein, G. y Torero, J. L., 2014. Volumetric scale-up of smouldering remediation of contaminated materials. En: *Journal of Hazardous Materials*, 268, pp. 51–60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.11.053>
- Torero, J. L.; Gerhard, J. I.; Martins, M. F.; Zanoni, M. A. B.; Rashwan, T. L. y Brown, J. K., 2020. Processes defining smouldering combustion: Integrated review and synthesis. En: *Progress in Energy and Combustion Science*, 81, 100869. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100869>
- Torres Brunengo, M.; Wyn, H. K.; Cuña, A.; Faccio, R.; Castiglioni, J. y Yermán, L., 2026. Self-sustained smouldering of low-calorific Uruguayan oil shales: influence of operational parameters and biomass addition. En: *Fuel*, 405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.136546>
- United States Environmental Protection Agency, 1998. [En línea]. *EPA methods*. Washington: EPA. Test Method 9071B. [Consulta: 18 de noviembre de 2015] Disponible en: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/9071b.pdf>
- Uruguay. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, 2015. *Evaluación de impacto ambiental parques eólicos*. Montevideo: MVOTMA.

Uruguay. Decreto 182/013, de 20 de junio de 2013. *Diario Oficial* [En línea], 27 de junio de 2013. [Consulta: 18 de noviembre de 2025]. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/182-2013>

Wyn, H. K.; Konarova, M.; Beltramini, J.; Perkins, G. y Yermán, L., 2020. Self-sustaining smouldering combustion of waste: A review on applications, key parameters and potential resource recovery. En: *Fuel Processing Technology*, 205, 106425.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106425>

Yermán, L., 2016. Self-sustaining Smouldering Combustion as a Waste Treatment Process. In Developments in Combustion Technology. En: *IntechOpen*.

DOI: <https://doi.org/10.5772/64451>

Yermán, L.; Cormier, D.; Fabris, I.; Carrascal, J.; Torero, J. L.; Gerhard, J. I. y Cheng, Y. L., 2017a. Potential bio-oil production from smouldering combustion of faeces.

En: *Waste and Biomass Valorization*, 8(2), pp. 329–338. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-016-9586-1>

Yermán, L.; Wall, H. y Torero, J. L., 2017b. Experimental investigation on the destruction rates of organic waste with high moisture content by means of self-sustained smoldering combustion. En: *Proceedings of the Combustion Institute*, 36(3), pp. 4419–4426. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.07.052>



Aplicación de ultrasonido en cultivos puros de *Microcystis sp.* y muestras de campo del Embalse San Roque (Córdoba, Argentina)

Application of ultrasound in pure cultures of *Microcystis sp.* and field samples from the San Roque Reservoir (Córdoba, Argentina)

Aplicação do ultrassom em culturas puras de *Microcystis sp.* e amostras de campo do reservatório San Roque (Córdoba, Argentina)

ARACELI FERREYRA (1)

AGOSTINA RIGATOSO (1)

CAMILA MUSSI (1)

PEDRO MANSUR (1)

JOAQUÍN FIERRO (1)

ROMÁN MARTINO (2)

JONATHAN MUCHIUT (1,2)

RUBÉN VRECH (2)

YADIRA ANSOAR-RODRÍGUEZ (3)

FLORENCIA E. ROMERO (4)

MICHAELA JUANEDA ALLENDE (1,2)

GUIDO MARCONI (3)

ANDRÉS RODRÍGUEZ (1,2)

(1) Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Córdoba, Argentina.

(2) Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología, CONICET/UNC, Córdoba, Argentina.

(3) Centro de Investigaciones Bioquímicas e Inmunología, Laboratorio de Investigaciones en Contaminación Acuática y Ecotoxicología, CONICET/UNC, Córdoba, Argentina.

(4) Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

RECIBIDO: 26/6/2025 → APROBADO: 23/9/2025  araceli.ferreyra@mi.unc.edu.ar

RESUMEN

La contaminación del agua constituye una problemática ambiental global. Los embalses de Córdoba, Argentina, atraviesan hace décadas un continuo proceso de contaminación

antrópica, que derivó en un avanzado estado de eutrofización. El Embalse San Roque (ESR) presenta eventos de dominancia de cianobacterias, como *Microcystis spp.*, capaces de producir cianotoxinas y afectar los usos del agua. Aún no se ha implementado un método eficiente de mitigación. El ultrasonido podría ser una alternativa. El objetivo de este trabajo fue evaluar, mediante ensayos de laboratorio, el efecto del ultrasonido ($f = 124$ kHz, $P = 20$ W, $t = 20$ min) sobre la abundancia y flotabilidad celular en muestras de *Microcystis spp.*, extraídas del ESR y de una cepa pura aislada del mismo embalse. Las variables se analizaron por recuento manual y automatizado. También se analizó clorofila intracelular y se observaron efectos sobre las vesículas de gas por microscopía electrónica de transmisión. Los resultados mostraron una reducción significativa en la abundancia celular en cultivos puros, y en células flotantes en muestras del ESR. Si bien estos ensayos fueron realizados a escala de laboratorio, aportan evidencia preliminar sobre los efectos del ultrasonido en *Microcystis spp.* y su potencial aplicación en estrategias de control de la calidad del agua.

Palabras clave: mitigación de floraciones algales, cianobacterias, transductores, contaminación acuática, eutrofización.

ABSTRACT

Water pollution represents a global environmental issue. The reservoirs of Córdoba, Argentina, have undergone decades of continuous anthropogenic contamination, leading to an advanced state of eutrophication. The San Roque Reservoir (ESR) experiences cyanobacterial dominance events, particularly by *Microcystis spp.*, which are capable of producing cyanotoxins and compromising water uses. To date, no efficient mitigation method has been implemented. Ultrasound could represent a potential alternative. Ultrasound represents a potential alternative. The aim of this study was to evaluate, through laboratory assays, the effect of ultrasound ($f = 124$ kHz, $P = 20$ W, $t = 20$ min) on cell abundance and buoyancy in *Microcystis spp.* samples collected from the ESR and from a pure strain isolated from the same reservoir. Variables were analyzed through manual and automated cell counts. Intracellular chlorophyll was also measured, and effects on gas vesicles were observed using transmission electron microscopy. The results showed a significant reduction in cell abundance in pure cultures and in floating cells from ESR samples. Although these experiments were conducted at laboratory scale, they provide preliminary evidence of the effects of ultrasound on *Microcystis spp.* and its potential application in water quality control strategies.

Keywords: mitigation of algal blooms, cyanobacteria, transducers, water pollution, eutrophication.

RESUMO

A poluição hídrica é um problema ambiental de nível global. Os reservatórios de Córdoba, Argentina, vêm sofrendo um processo contínuo de poluição antropogênica há décadas, o que levou a um estado avançado de eutrofização. O Reservatório San Roque (RSR)



apresenta eventos com predominância de cianobactérias, como *Microcystis spp.*, capazes de produzir cianotoxinas e afetar os usos da água. Ainda não foi implementado um método eficiente de mitigação. O ultrassom pode ser uma alternativa. O objetivo deste estudo foi avaliar, por meio de testes laboratoriais, o efeito do ultrassom ($f = 124$ kHz, $P = 20$ W, $t = 20$ min) na abundância e flotabilidade celular em amostras de *Microcystis spp.*, extraídas do RSR e de uma cepa pura isolada do mesmo reservatório. As variáveis foram analisadas por contagem manual e automatizada. Também foi avaliada clorofila intracelular e efeitos nas vesículas de gás por meio de imagens de microscopia eletrônica de transmissão. Os resultados mostraram uma redução significativa da abundância celular em culturas puras e nas células flutuantes nas amostras do RSR. Embora esses ensaios tenham sido conduzidos em escala laboratorial, eles fornecem evidências preliminares sobre os efeitos do ultrassom em *Microcystis spp.* e sua potencial aplicação em estratégias de manejo da qualidade da água.

Palavras-chave: mitigação de proliferação de algas, cianobactérias, transdutores, poluição aquática, eutrofização.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua constituye una problemática ambiental a nivel global que afecta a los ecosistemas (Chen et al., 2019). El cambio climático y las actividades antropogénicas han provocado graves problemas de contaminación hídrica (Yang et al., 2025). En particular, el exceso de nutrientes generado por parte de estas actividades ha acelerado notablemente la eutrofización de los cuerpos de agua (Klapper, 1991 y Wetzel, 2001). Una de las expresiones más inminentes de este tipo de contaminación son las floraciones algales nocivas (FAN) (Aguilera et al., 2023). El término FAN es funcional, no taxonómico, y se utiliza para describir proliferaciones de organismos fotosintéticos densos. Dentro de las FAN se incluyen las “ciano-FAN”, proliferaciones masivas de cianobacterias, un fenómeno global presente en cuerpos de aguas superficiales, causando efectos adversos en ecosistemas acuáticos así como problemas de salud pública (Sosa Benegas et al., 2020). Estos eventos se vuelven cada vez más intensos y generalizados con el aumento de las temperaturas y la estratificación del agua (Dick et al., 2021). Como se reporta en la revisión de Reichwaldt y Ghadouani (2012), los cambios en los patrones de precipitación podrían generar un impacto significativo en la dinámica de las floraciones de cianobacterias. A largo plazo, los eventos de lluvia intensa pueden incrementar la frecuencia de floraciones debido a un mayor aporte de nutrientes por escorrentía, mientras que los períodos de sequías generan condiciones favorables para la proliferación de especies potencialmente tóxicas, asociadas a una columna de agua más estable, temperaturas elevadas y un aumento del grado de eutrofización.

Las floraciones algales degradan la calidad del agua utilizada para diferentes fines (consumo humano, recreativo, pesquero), amenazando al ecosistema acuático en particular, la seguridad hídrica mundial y generando altos costos económicos. En América Latina, una de las principales reservas mundiales de agua dulce, la información sobre este fenómeno y su posible mitigación es escasa (Aguilera et al., 2023). Más del 75 % de las floraciones de cianobacterias producen toxinas (cianotoxinas) afectando la vida

silvestre y los seres humanos (Chorus, 2001; Breidenbach et al., 2022; Lomeo et al., 2024; Tornabene et al., 2024).

Los embalses de la provincia de Córdoba, Argentina, atraviesan desde hace varias décadas un continuo proceso de contaminación, que los ha llevado a un estado general y avanzado de eutrofización (Prosperi, 2021). En la actualidad uno de los ambientes acuáticos continentales más problemáticos del país, debido a su avanzado grado de eutrofización, es el Embalse San Roque (ESR) (Daga et al., 2020), el cual se encuentra ubicado en el centro oeste de la provincia de Córdoba. El ESR es multipropósito: se destina al abastecimiento de agua, la generación de energía eléctrica, el riego, el control de crecidas y el uso recreativo. Presenta frecuentes eventos de floraciones algales, entre ellas, de la cianobacteria *Microcystis sp.* (Halac et al., 2020; Prosperi, 2021). Frente a esta problemática, es prioritario avanzar en estrategias de control de cianobacterias. Una herramienta de mitigación posible es el ultrasonido (US), el cual podría afectar las cianobacterias sin generar daño celular que aporte metabolitos secundarios al medio (Kibuye et al., 2021; Sukenik y Kaplan, 2021). El US tiene la capacidad de colapsar las vesículas de gas intracelulares (Water Research Australia, 2015), estructuras que permiten a las células regular su flotabilidad y alcanzar la superficie para realizar fotosíntesis (Kibuye et al., 2021; Sukenik y Kaplan, 2021). Como cita Vaughan et al. (2023) y expone la investigación de Kibuye et al. (2021), las características de las vesículas varían entre especies, por lo que se requiere ajustar la potencia y la frecuencia ultrasónica dependiendo del microorganismo.

En este sentido, validar el US como herramienta de mitigación resulta un desafío. En base a estos precedentes, en este trabajo se planteó como objetivo general evaluar los efectos del US configurado a 124 kHz de frecuencia y 20 W de potencia, sobre la abundancia y la flotabilidad en muestras con dominancia del género *Microcystis sp.* recolectadas en el ESR y cultivos puros del mismo género aislados del embalse.

A su vez, este estudio constituye una continuación de un trabajo previo realizado en el Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba (Romero et al., 2024), en el que se evaluó el efecto del mismo transductor de US sobre muestras del embalse. Particularmente, en este trabajo se incorporan muestras de cultivo puro y se profundiza en el análisis de la variable flotabilidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación de las muestras utilizadas en los ensayos

Cultivo puro de *Microcystis sp.*: a partir de una cepa pura no axénica de *Microcystis sp.* aislada del ESR por el Centro de Excelencia en Procesos y Productos de Córdoba (CEPROCOR) y mantenida en el Laboratorio de Hidráulica, se inoculó cultivo puro de *Microcystis sp.*, en botellas con medio de cultivo Z8 (modificado por CEPROCOR). Las mismas se incubaron con la mitad inferior cubierta con papel, para asegurar de que las células busquen la luz en la superficie y produzcan vesículas de gas.

Muestras extraídas del ESR con alta abundancia de *Microcystis sp.*: la Figura 1 muestra los dos puntos del ESR donde fueron colectados 10 L de muestra en bidones plásticos translúcidos durante la campaña realizada en noviembre de 2024. Las muestras fueron trasladadas al laboratorio (a temperatura ambiente), las cuales se mezclaron con el fin de obtener un volumen total de 20 L. Para verificar la presencia de cianobacterias antes de comenzar el experimento, se tomó una muestra y fue observada bajo microscopio óptico.

Los géneros de cianobacteria dominantes fueron *Microcystis spp.* y *Dolichospermum.sp.*

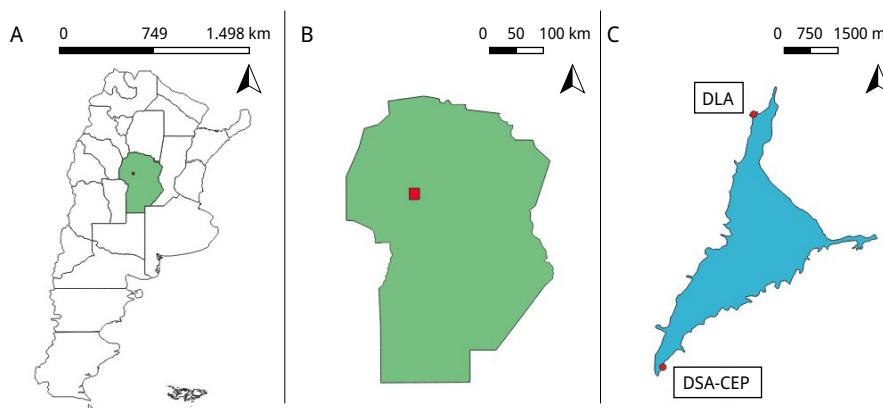


FIGURA 1. Puntos de muestreo de cianobacterias en el ESR. A) Mapa de Argentina resaltando la Provincia de Córdoba. B) Provincia de Córdoba, en rojo localización del ESR. C) Puntos de muestreo del ESR. DLA: Desembocadura Las Mojarras ($31^{\circ}20'14.8''S$ $64^{\circ}28'10.7''W$). DSA-CEP: Desembocadura San Antonio, Cuerpo Especial de Policía ($31^{\circ}24'47.9''S$ $64^{\circ}29'47.9''W$).

Ultrasonido (US)

Se utilizó un transductor de US de la empresa holandesa LG Sonic (Ginpertec con 59,5 mm de diámetro y 98 mm de altura). Se activó mediante un amplificador desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC). La frecuencia y potencia aplicada fue de 124 kHz y 20 W respectivamente, las cuales fueron medidas a lo largo del experimento para monitorear su permanencia y estabilidad.

Para evaluar la estabilidad del transductor de US, durante el tiempo de exposición y las tres réplicas de los ensayos, se fue midiendo frecuencia, potencia y temperatura. Se realizaron gráficos utilizando lenguaje de programación Python (Python Software Foundation, 2024), en el entorno Visual Studio Code. Se emplearon las bibliotecas *pandas* (McKinney, 2010), *numpy* (Harris et al., 2020), *matplotlib* (Hunter, 2007) y *seaborn* (Waskom, 2021).

Diseño experimental

Con el objetivo de evaluar los efectos del US sobre *Microcystis spp.*, se llevaron a cabo ensayos de laboratorio bajo condiciones controladas, utilizando cultivos puros y muestras naturales extraídas del ESR. La condición experimental del ensayo constó

de un grupo control (C) no expuesto (transductor apagado) y un grupo tratamiento (T) donde se aplicó US a 124 kHz de frecuencia y 20 W de potencia durante 20 min. El tiempo de exposición y los parámetros ultrasónicos fueron determinados en base a experiencias previas, donde las células comenzaron a sedimentar a partir de los 10 min. El volumen empleado fue de 600 ml, el cual fue considerado por la limitación que supone escalar cultivos puros, priorizando la obtención de resultados comparables en dos tipos de muestras diferentes. En lo que respecta a la temperatura ambiente, la misma se acondicionó a 27 °C (en línea con la temperatura utilizada en cultivos puros en cámara de cultivo, 27 °C ± 1) (Jiaqi et al., 2017).

Los ensayos se realizaron en dos recipientes acrílicos transparentes de 64 mm de diámetro y 19 cm de altura, cada uno fijado a un transductor de US. Antes de aplicar el US se midió pH y temperatura. Para evaluar la temperatura se realizaron gráficos exploratorios con datos obtenidos durante el tiempo de exposición utilizando lenguaje de programación Python (Python Software Foundation, 2024), en el entorno Visual Studio Code. Se emplearon las bibliotecas *pandas* (McKinney, 2010), *numpy* (Harris et al., 2020), *matplotlib* (Hunter, 2007) y *seaborn* (Waskom, 2021).

Las variables medidas fueron abundancia y flotabilidad celular, evaluadas en tres tiempos diferentes: t1 (antes de encender el US), t2 (cuando se apagó el US a los 20 min) y t3 (luego de cuatro días de reposo). Para esto, fueron tomadas submuestras en cada uno de los diferentes tiempos. Además, en el ensayo con cultivos puros, se tomaron submuestras adicionales para la observación de vesículas de gas por microscopía electrónica de transmisión (MET) y para determinar clorofila como indicador de lisis celular. Los experimentos se realizaron por triplicado y se lavó cuidadosamente todo el material para evitar contaminación cruzada.

Para evaluar la abundancia, se realizó el recuento celular de forma manual (para las muestras del ESR) en cámara de Fuchs Rosenthal, por microscopía óptica (Leica DM750 con cámara ICC50 W, Alemania), siguiendo el protocolo desarrollado en el Instituto Nacional del Agua (Ferreyra et al., 2023). Para las muestras de cultivo puro se utilizó la cámara de recuento en combinación con MatLab (protocolo de recuento automatizado desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica de la UNC). Los datos obtenidos fueron registrados en una planilla de cálculos Excel diseñada para expresar los resultados en cel/ml ó cel/L. Con los mismos se calculó un promedio por muestra para luego realizar los análisis estadísticos correspondientes en Python (Python Software Foundation, 2024), en el entorno Visual Studio Code.

Para evaluar la flotabilidad, las submuestras se reservaron en buretas y se dejaron reposar verticalmente. En cultivos puros, se reservaron en incubadora a 27 ± 1 °C, con la mitad inferior cubierta, para favorecer el ascenso de células flotantes. En el caso de las submuestras del ESR, este paso no fue necesario ya que las células agregadas en colonias flotan con mayor facilidad. En ambos ensayos se descartaron los mililitros inferiores y se fijó la fracción superior con Lugol para su posterior recuento y análisis. Además, se tomaron fotografías de los recipientes del ensayo desde el frente y desde arriba antes y después de aplicar el tratamiento, como complemento visual de los resultados.

Después del tiempo de exposición, se midió nuevamente el pH, se tomaron nuevas submuestras y se almacenaron los volúmenes restantes para el período de reposo. Con los resultados obtenidos del recuento celular, se calculó el porcentaje de diferencia de

flotabilidad en el tratamiento en relación con el control, de acuerdo con la siguiente fórmula (Rodriguez-Morales et al., 2014):

$$\%F_{xml} = \left(1 - \frac{Ab_{xml}^T}{Ab_{xml}^C} \right) \times 100 \% \quad (1)$$

Siendo F la flotabilidad, Ab_{xml}^T la abundancia en la muestra de los xml superiores del tratamiento, y Ab_{xml}^C la abundancia de los xml del control.

En cuanto al análisis cualitativo de la flotabilidad, se utilizaron fotografías para observar las diferencias en la estratificación celular dentro de la columna de agua. Estas observaciones se realizaron para las muestras control y tratamiento de los tiempos 2 y 3.

Análisis de microscopía electrónica de transmisión (MET)

Con el objetivo de observar el impacto del US en las vesículas de gas en cultivos puros de *Microcystis sp.*, se enviaron muestras para obtener imágenes de MET al Centro de Microscopía Electrónica, Facultad de Ciencias Médicas, UNC. En primera instancia, las muestras se lavaron con un buffer de fosfato salino (PBS) y fijaron en una mezcla de Karnovsky, compuesta por formaldehído al 4 % (p/v) y glutaraldehído al 2 % (p/v) en buffer de cacodilato 0,1 M, durante 2 hs antes de centrifugar. El material sedimentado fue lavado nuevamente y tratado (O_2O_4 al 1 % durante 1 h), para su tinción en bloque con acetato de uranilo al 1 % en tampón de acetato 0,1 M pH 5,2 durante 20 min. Después de la deshidratación las células se incorporaron en resina Spurr para realizar los cortes. Finalmente, las rejillas se tiñeron con acetato de uranilo/citrato de plomo y se examinaron en un Microscopio electrónico Hitachi HT 7800 (Hitachi, Tokio, Japón) operado a 80 kV y fotografiado con una cámara NS 15 AMT (Advanced Microscopy Techniques Corp., Woburn, MA, EE. UU.). A partir de las micrografías obtenidas, se seleccionaron de cada muestra 20 células al azar.

Análisis de clorofila intracelular

En este estudio, la clorofila intracelular de las cianobacterias se utilizó como un indicador indirecto del grado de lisis celular. Mientras las células se mantienen íntegras, conservan su contenido de clorofila; en cambio, cuando ocurre lisis, la clorofila se libera al medio y se degrada.

De este modo, al cuantificar la clorofila intracelular en conjunto con la abundancia celular, es posible estimar las células viables después del tratamiento. Una disminución en la clorofila, acompañada de una reducción en el número de células, refleja una mayor pérdida de integridad celular asociada al proceso de lisis.

El análisis de las muestras para la evaluación de clorofila intracelular se realizó en Aguas Cordobesas S.A.



Análisis estadístico

Con los datos obtenidos del recuento celular de abundancia (células totales) y flotabilidad (células flotantes) se realizó un Análisis de la varianza (ANOVA) y una prueba de Tukey en el caso correspondiente.

Además, se aplicó un análisis de medidas repetidas para el factor tiempo, dado que las mediciones en los distintos momentos provinieron de una misma unidad experimental. Este método permite considerar la dependencia entre observaciones y evaluar correctamente los cambios a lo largo del tiempo.

Los análisis mencionados se efectuaron en Python (Python Software Foundation, 2024), en el entorno Visual Studio Code. Se emplearon las bibliotecas *pandas* (McKinney, 2010), *numpy* (Harris et al., 2020), *matplotlib* (Hunter, 2007), *statsmodels* (Seabold y Perktold, 2010) y *seaborn* (Waskom, 2021).

RESULTADOS

Durante los ensayos el registro de la frecuencia y la potencia de US mostró estabilidad, con mínimas variaciones respecto de lo configurado. Los registros de la temperatura también se mantuvieron dentro del rango esperado.

Ensayo con cultivo puro

Abundancia celular vs tiempo

El ANOVA mostró un efecto significativo del tiempo sobre la abundancia ($F(2,12) = 56,04, p < 0,001$), mientras que la condición experimental, C vs T ($F(1,12) = 0,02, p = 0,89$) y la interacción entre ambos factores ($F(2,12) = 0,84, p = 0,46$) no fueron significativos.

La prueba de Tukey revela que hay diferencias significativas para la abundancia celular de las muestras tras la aplicación de US (T, en tiempo 2), la abundancia celular disminuyó en comparación con C en el tiempo 1 y 2, y con T en el tiempo 1. En el tiempo 3, aumentó la cantidad de cel/L respecto del tiempo 1 y 2 para todas las muestras. La figura 2, muestra la abundancia celular (cel/L) en C y T respecto del tiempo. Se observan variaciones principalmente en el tiempo 3 respecto del tiempo 1 y 2.

El ANOVA de medidas repetidas mostró resultados equivalentes al ANOVA factorial ($F(2,6) = 87,66, p < 0,0001$).



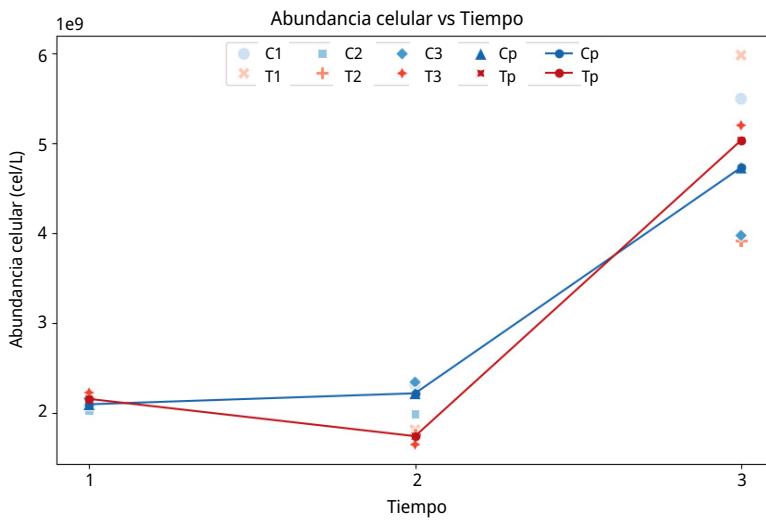


FIGURA 2. Ensayo de cultivo puro. Abundancia celular en valores $\times 10^9$ cel/L vs tiempo.
C1: muestra control de la réplica 1. C2: muestra control de la réplica 2. C3: muestra control de la réplica 3. Cp: promedio de muestras control para las tres réplicas. T1: muestra tratamiento de la réplica 1. T2: muestra tratamiento de la réplica 2. T3: muestra tratamiento de la réplica 3. Tp: promedio de muestras tratamiento para las tres réplicas (C1-T1, C2-T2, C3-T3).

Flotabilidad

Resultado cualitativo de flotabilidad

En la Figura 3 se observa una mayor sedimentación de las células en los tratamientos respecto del control en todas las réplicas. Las fotografías de las muestras en reposo vistas desde la superficie también muestran esta tendencia; se observa una menor cantidad de células en la superficie de los tratamientos en comparación con los controles.

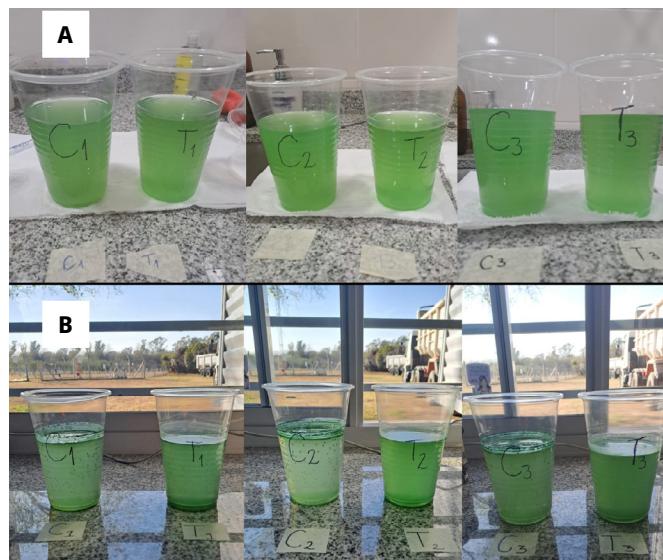


FIGURA 3. Ensayo de cultivo puro. Imágenes macroscópicas de flotabilidad en el control C y tratamiento T para las tres réplicas (C1-T1, C2-T2, C3-T3). A) Tiempo 2. B) Tiempo 3.

Resultado cuantitativo de flotabilidad

Si bien se observó una tendencia a la disminución en la flotabilidad en el tratamiento T durante el tiempo 2, y un aumento en el tiempo 3 respecto al tratamiento C (Figura 4), el ANOVA no reveló diferencias significativas en la abundancia de células flotantes entre tiempos ni entre grupo control y tratamiento. Los efectos del tiempo ($F(2,12) = 2,32$, $p = 0,14$), de la condición experimental ($F(1,12) = 0,38$, $p = 0,55$) y de su interacción ($F(2,12) = 0,77$, $p = 0,48$) no fueron estadísticamente significativos. El ANOVA de medidas repetidas mostró resultados equivalentes al ANOVA factorial ($F(2,6) = 2,95$, $p = 0,1282$).

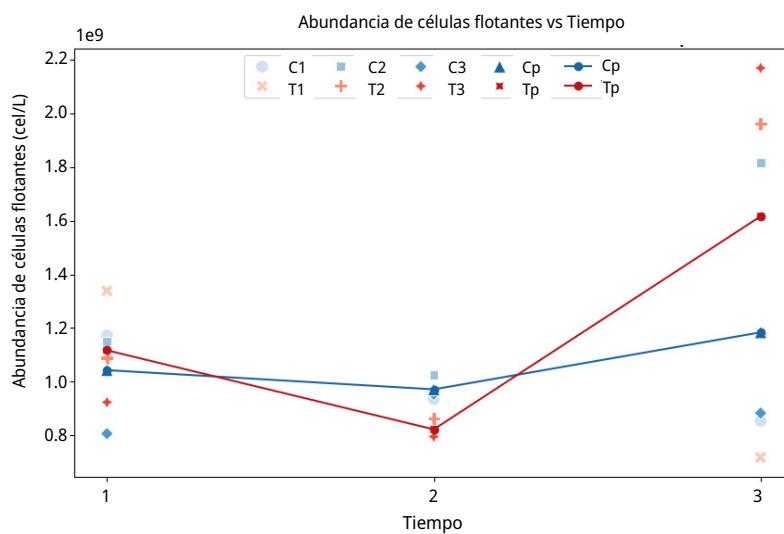


FIGURA 4. Ensayo de cultivo puro. Abundancia celular en valores $\times 10^9$ cel/L vs tiempo. C1: muestra control de la réplica 1. C2: muestra control de la réplica 2. C3: muestra control

de la réplica 3. Cp: promedio de muestras control para las tres réplicas. T1: muestra tratamiento de la réplica 1. T2: muestra tratamiento de la réplica 2. T3: muestra el tratamiento de la réplica 3. Tp: promedio de muestras tratamiento para las tres réplicas (C1-T1, C2-T2, C3-T3).

Diferencia porcentual de células flotantes

Resultados de la diferencia porcentual de células flotantes en T con respecto a C, para las muestras de los tiempos 1, 2 y 3. Los valores positivos indican una mayor flotabilidad en el control, mientras que los negativos una mayor flotabilidad en las muestras provenientes del tratamiento.

TABLA 1. Ensayo de cultivo puro. Resultados del cálculo del porcentaje de flotabilidad en el tratamiento con respecto al control.

Réplica	Tiempo	Fecha de toma de muestra	Fecha de análisis	Porcentaje de diferencia relativa al control (S4cm)
T1	1	02/09/24	03/09/24	-14,27
T1	2	02/09/24	03/09/24	13,60
T1	3	06/09/24	13/09/24	15,93
T2	1	02/09/24	03/09/24	5,43
T2	2	02/09/24	03/09/24	15,86
T2	3	06/09/24	18/09/24	-8,09
T3	1	02/09/24	05/09/24	-14,54
T3	2	02/09/24	05/09/24	16,62
T3	3	06/09/24	24/09/24	-145,99



Microscopía electrónica de transmisión

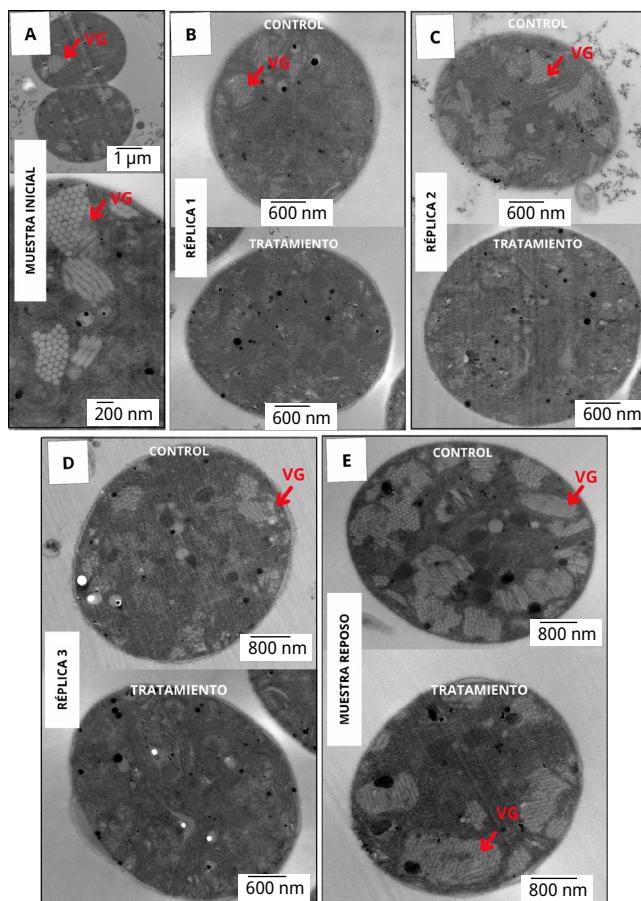


FIGURA 5. Imágenes de microscopía electrónica de transmisión (MET) de *Microcystis sp.* de cultivos puros. Vesículas de gas (VG), señaladas con flechas rojas. Células tratadas, con vesículas colapsadas. A) Muestra inicial. Escalas: 1 μ m (arriba) y 200 nm (abajo). B) Réplica 1: comparación entre células control y tratadas. Escalas: 600 nm. C) Réplica 2: comparación entre células control y tratadas. Escalas: 600 nm. (D) Réplica 3: comparación entre células control y tratadas. Escalas: 600 nm (arriba) y 800 nm (abajo). (E) Muestra de reposo: comparación entre células control y tratadas. Escalas: 800 nm.

Clorofila intracelular

El ANOVA mostró un efecto significativo del tiempo sobre la concentración de clorofila ($F(2,12) = 33,92, p < 0,001$) mientras que no se encontraron diferencias significativas para la condición experimental ($F(1,12) = 0,93, p = 0,355$) ni para su interacción ($F(2,12) = 1,03, p = 0,388$). A pesar de la significancia para uno de los factores, la prueba de Tukey no mostró resultados concluyentes; no se evidencia ningún patrón consistente entre los tiempos de exposición al ultrasonido.

El análisis de medidas repetidas mostró un efecto significativo del factor tiempo sobre la variable de respuesta ($F(2,4) = 39,30, p = 0,0023$), consistente con el resultado del ANOVA factorial.

Ensayo con muestra del ESR

Abundancia celular vs tiempo

Si bien se observaron tendencias a la disminución de células después de la aplicación del US en los resultados obtenidos, el ANOVA para la abundancia celular en el ensayo ESR no mostró efectos significativos del tiempo ($F(2,12) = 1,09, p = 0,368$), de la condición experimental ($F(1,12) = 0,29, p = 0,602$), ni de su interacción ($F(2,12) = 2,29, p = 0,144$).

Al igual que para el ANOVA factorial, el análisis de medidas repetidas no mostró un efecto significativo del factor tiempo sobre la variable de respuesta ($F(2,4) = 1,28, p = 0,37$).

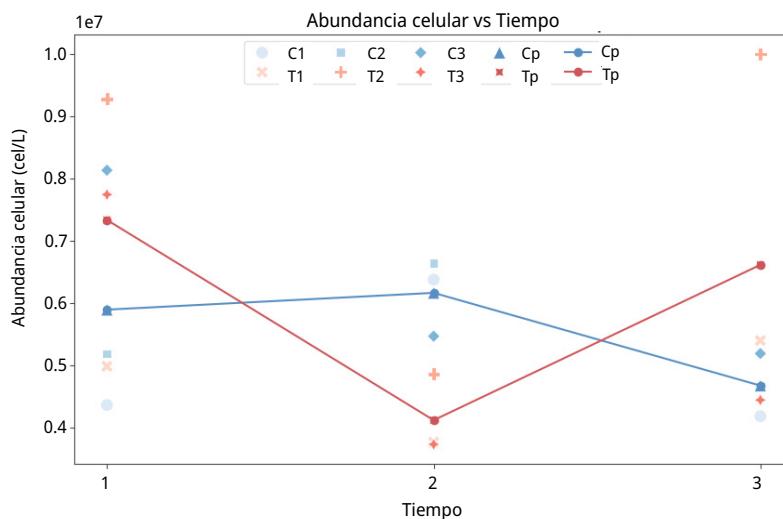


FIGURA 6. Ensayo ESR. Abundancia celular en valores $\times 10^7$ cel/L vs tiempo. C1: muestra control de la réplica 1. C2: muestra control de la réplica 2. C3: muestra control de la réplica 3. Cp: promedio de muestras control para las tres replicas. T1: muestra tratamiento de la réplica 1. T2: muestra tratamiento de la réplica 2. T3: muestra tratamiento de la réplica 3. Tp: promedio de muestras tratamiento para las tres réplicas (C1-T1, C2-T2, C3-T3).

Flotabilidad

Resultado cualitativo de flotabilidad

La Figura 7A muestra una notable pérdida de flotabilidad en el tratamiento, formando una capa de sedimento en las tres réplicas para el tiempo 2. Las células de los tratamientos, después de los cuatro días de reposo (tiempo 3), no recuperaron flotabilidad (Figura 7B).



FIGURA 7. Ensayo ESR. Imágenes macroscópicas de flotabilidad en C y T para las tres réplicas (C1-T1, C2-T2, C3-T3). A) tiempo 2. B) tiempo 3.

Resultado cuantitativo de flotabilidad

El ANOVA para la abundancia de flotabilidad en el ensayo ESR mostró efectos significativos tanto del tiempo ($F(2,12) = 25,45, p < 0,001$) como de la condición experimental ($F(1,12) = 34,72, p < 0,001$). La interacción entre tiempo y condición experimental no fue significativa ($F(2,12) = 3,25, p = 0,074$), aunque el valor de p se aproximó al umbral de significancia (0,05). La prueba de Tukey evidenció que el tratamiento en los tiempos t2 y t3 presentaron una reducción marcada de la abundancia celular y estadísticamente significativa, frente al control en t1 y t3. El control en t1, t2 y t3 mostró variaciones menores, con una única diferencia significativa entre control en t1 y control en t3.

Como puede observarse en la Figura 8, tanto para el t2 y t3 (post aplicación de US) la cantidad de células flotantes por litro disminuyó en el tratamiento para las tres réplicas, respecto de C y T para el t1.

El análisis de medidas repetidas mostró consistencia con los resultados del ANOVA factorial, es decir, que hubo un efecto significativo del factor tiempo sobre la variable de respuesta ($F(2,4) = 27,19, p = 0,0047$).

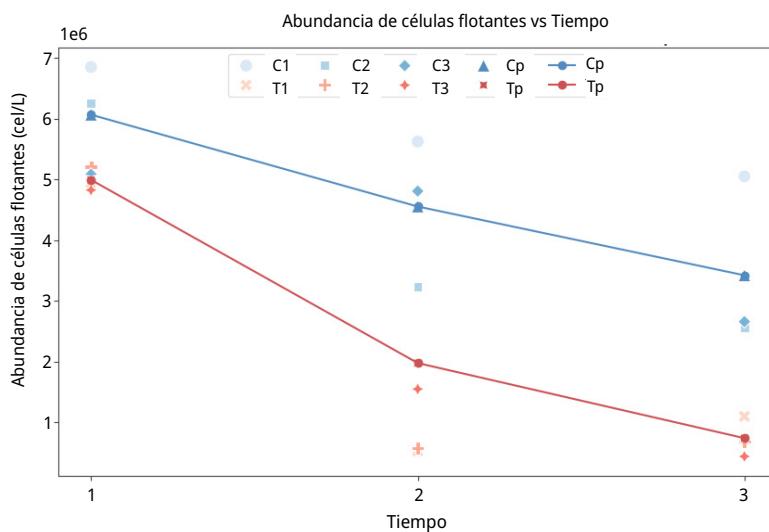


FIGURA 8. Ensayo ESR. Abundancia de células flotantes en valores $\times 10^6$ cel/L vs tiempo. C1: muestra control de la réplica 1. C2: muestra control de la réplica 2. C3: muestra control de la réplica 3. Cp: promedio de muestras control para las tres réplicas. T1: muestra tratamiento de la réplica 1. T2: muestra tratamiento de la réplica 2. T3: muestra tratamiento de la réplica 3. Tp: promedio de muestras tratamiento para las tres réplicas (C1-T1, C2-T2, C3-T3).

Porcentaje relativo de células flotantes del tratamiento respecto al control

Los resultados de la diferencia porcentual de células flotantes en el tratamiento con respecto al control para las muestras de los tiempos 1, 2 y 3 se exponen en la Tabla 2. Los valores positivos indican una menor flotabilidad celular en el tratamiento respecto del control.

TABLA 2. Ensayo ESR. Valores de recuento celular por tratamiento (C y T) y réplicas (1, 2 y 3) en los tiempos inicial (1), final (2) y reposo (3). Cálculo de porcentaje de diferencia de la abundancia de células flotantes en el tratamiento relativo al control. Valores positivos indican mayor abundancia en el control y valores negativos mayor en el tratamiento.

Etapa	Tiempo	Fecha de toma de muestra	Fecha de análisis	Porcentaje de diferencia relativa al control
T1	1	21/11/24	22/11/24	27,81
T1	2	21/11/24	03/12/24	90,74
T1	3	21/11/24	17/12/24	78,35
T2	1	21/11/24	10/12/24	16,85
T2	2	21/11/24	13/12/24	82,26
T2	3	21/11/24	10/01/24	73,47
T3	1	21/11/24	16/12/24	5,12
T3	2	21/11/24	16/12/24	67,87
T3	3	21/11/24	10/01/24	83,66

DISCUSIÓN

Ante el panorama actual, con una fuerte influencia antrópica sobre el ambiente, existe una gran demanda de estrategias de remediación eficientes en el tratamiento de aguas contaminadas. Para afrontar esta problemática, se han estudiado varias tecnologías alineadas con objetivos de protección ambiental y desarrollo sostenible. La tecnología ultrasónica se ha posicionado en un lugar clave y estratégico en ecosistemas acuáticos, respecto a la mitigación de las floraciones algales. Esta tecnología cuenta con un potencial que supera algunas limitaciones de los métodos de remediación existentes (Lv et al., 2024).

En este estudio, tanto los cultivos puros de *Microcystis sp.* como las muestras del ESR fueron sometidas a 124 kHz y 20 W de tratamiento ultrasónico, frecuencia y potencia ya aplicadas en estudios previos realizados por Romero et al. (2024).

Tanto los valores de frecuencia, potencia y temperatura de los transductores ultrasónicos se mantuvieron en los rangos esperados, estabilizándose en los primeros minutos. La medición de estos parámetros resulta clave para validar el funcionamiento del US durante el tiempo de exposición de cada una de las muestras.

Los resultados mostraron que la abundancia celular disminuyó significativamente en el ensayo con cultivos puros, a diferencia del ensayo con la muestra del ESR donde no se observaron diferencias significativas. Esto se debe a que los cultivos puros presentan mayormente células aisladas y escaso material extracelular segregado (Kieffer et al., 2015), en comparación con las muestras del ESR donde *Microcystis* predomina de forma

agrupada por la presencia del mucílago, el cual favorece su supervivencia ante predadores (Yu et al., 2013; Yang et al., 2025).

Resultados similares fueron obtenidos en el trabajo previo de Romero et al. (2024), donde evidenciaron que la abundancia celular total no reflejó efectos bajo tratamiento ultrasónico en muestras del ESR.

Los resultados luego de cuatro días de reposo mostraron un aumento de la abundancia celular en cultivos puros, no así, en muestras del ESR. Esto indica que, en los cultivos puros, las células viables recuperan su integridad y/o se reproducen durante los días de reposo independientemente del tratamiento. Esto coincide con trabajos que describen la capacidad de *Microcystis* de recuperarse y proliferar tras interrupciones temporales de su integridad celular (Zhang et al., 2006; Lürling et al., 2016).

La variable clorofila, asociada directamente a las células de *Microcystis* en cultivos puros, no evidenció asociación con la abundancia celular que permita evaluar lisis. Si bien los resultados obtenidos no son concluyentes, otros estudios han reportado la medición de este pigmento como indicador de lisis celular (Wert et al., 2013; Mehta et al., 2015). Es fundamental continuar perfeccionando las técnicas de medición de pigmentos, ya que esto permitiría inferir la posible liberación de toxinas al medio como consecuencia de la lisis celular, reduciendo costos y optimizando el tiempo de análisis.

Respecto a los resultados de flotabilidad celular, cualitativamente se observó una menor cantidad de células en la superficie en el tratamiento respecto al control para cultivos puros, aunque sin diferencias estadísticamente significativas. Las imágenes del MET constatan la formación de vesículas. Los hallazgos cualitativos obtenidos con esta herramienta revelaron una reducción en las vesículas de gas en las células expuestas al US. Estos resultados coinciden con lo reportado por Romero et al. (2024), que muestra desagregación y un marcado descenso en el porcentaje de vesículas de gas en células tratadas con US. Es probable que, aumentando el número de repeticiones, se puedan encontrar diferencias estadísticamente significativas ya que se logró obtener evidencia de los efectos sobre esta variable desde múltiples perspectivas: diferencia porcentual de células flotantes y cualitativamente a partir de fotografías macro y de observaciones de imágenes de MET.

Sin embargo, en las muestras del ESR, se observa una notable pérdida de flotabilidad que no se recupera después de los cuatro días de reposo, con diferencias estadísticamente significativas para todos los tiempos de exposición estudiados. Heng et al. (2009) expone que la aplicación de US disminuye significativamente la cantidad de células, por cavitación acústica, sin aumentar la concentración de microcistinas en el medio. En nuestro caso, si bien no se evaluaron los niveles de toxinas, la pérdida de flotabilidad está asociada a un daño estructural de las vesículas de gas, pero sin colapso celular, lo cual se ve reflejado en los resultados de abundancia.

Varios autores realizan ensayos similares con otros cultivos, utilizando frecuencias, potencias, tiempo y volúmenes diferentes mostrando una gran variabilidad (Rajasekhar et al., 2012; Kieffer et al., 2015; Lv et al., 2024). Existen algunos reportes sobre la aplicación del ultrasonido a campo, en la tesis doctoral de Purcell (2009) se menciona que ciertas especies unicelulares y filamentosas fueron susceptibles al tratamiento ultrasónico durante los primeros 30 días de crecimiento de la floración, pero que luego de ese periodo no se observó control sobre los microorganismos. En el trabajo de Míguez et al.

(2016) se reporta la aplicación de US en un tajamar, en el cual se observó una disminución de la clorofila en un plazo de 7 días.

En términos prácticos, los resultados obtenidos en este trabajo aportan evidencia sobre la eficacia potencial del ultrasonido en condiciones controladas, pero también ponen de manifiesto los desafíos para su implementación a mayor escala.

Tanto el tipo de muestra como el volumen, el tiempo y las características ultrasónicas son fundamentales para obtener resultados que nos permitan cumplir con nuestro objetivo. Por ello, la extrapolación de los resultados de laboratorio al campo requiere considerar parámetros hidrodinámicos, profundidad del cuerpo de agua, volumen tratado y distribución espacial de los transductores.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio aportan evidencia sobre el potencial que tiene el US como herramienta de control de floraciones algales nocivas, específicamente sobre la cianobacteria *Microcystis spp.* La aplicación de ultrasonido (124 kHz, 20 W), en ensayos a escala de laboratorio, produjo efectos sobre abundancia (cultivos puros) y la flotabilidad celular (muestras ESR) de *Microcystis spp.* Estos hallazgos denotan la importancia de considerar las características de las muestras como también las condiciones experimentales (frecuencia, potencia, tiempo de exposición y volumen) al evaluar la herramienta.

El US podría ser una herramienta útil, aunque para su implementación se requerirá de ajustes precisos y estrategias acordes al espacio físico donde se considere aplicar.

REFERENCIAS

- Aguilera, A.; Almanza, V.; Haakonsson, S.; Palacio, H.; Rodas, G. A. B.; Barros, M. U.; Capelo-Neto, J.; Urrutia, R.; Aubriot, L. and Bonilla, S., 2023. Cyanobacterial bloom monitoring and assessment in Latin America. En: *Harmful Algae*, 125, 102429. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hal.2023.102429>
- Breidenbach, J.D.; French, B.W.; Gordon, T.T.; Kleinhenz, A.L.; Khalaf, F.K.; Willey, J.C.; Hammersley, J.R.; Wooten, R.M.; Crawford, E.L.; Modyanov, N.N.; Malhotra, D.; Teeguarden, J.G; Haller, S.T. y Kennedy, D.J., 2022. Microcystin-LR aerosol induces inflammatory responses in healthy human primary airway epithelium. En: *Environment International*, 169, 107531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107531>
- Chen, B.; Wang, M.; Duan, M.; Ma, X.; Hong, J.; Xie, F and Zhang, R. y Li, X., 2019. In search of key: Protecting human health and the ecosystem from water pollution in China. En: *Journal of Cleaner Production*, 228, pp. 101-111.
- Chorus, I., 2001. Toxic effects and substances in cyanobacteria other than microcystins, anatoxin-a and saxitoxins. En: Chorus, I., ed. *Cyanotoxins: Occurrence, causes, consequences*. Berlín: Springer. pp. 281–315.
- Daga, I.C.; Fernández Belmonte, M.C. y Reyna, S.M., 2020. Composición algal y bioindicadores de calidad de agua. Caso de estudio: Embalse San Roque, Córdoba.



- Argentina. En: *Cuadernos de Investigación Serie HAM*, 26. DOI: <https://doi.org/10.35305/curiham.v26i0.143>
- Dick, G. J.; Duhaime, M. B.; Evans, J. T.; Errera, R. M.; Godwin, C. M.; Kharbush, J. J.; Nitschky, H.S.; Powers, M.A.; Vanderploeg, H.A.; Schmidt, K.C.; Smith, D.J.; Yancey, C.E.; Zwiers, C.C. and Denef, V. J., 2021. The genetic and ecophysiological diversity of *Microcystis*. En: *Environmental Microbiology*, 23(12), pp. 7278-7313.
DOI: <https://doi.org/10.1111/1462-2920.15615>
- Ferreysa, A.; Romero, F. E.; Rodriguez, M. I.; Juaneda Allende, M.; Ruiz, M. A. y Rodriguez, A., 2023. Propuesta de protocolo de recuento *Microcystis sp.* (resumen extendido) [En línea]. En: Instituto Nacional del Agua. *XXVII Congreso Nacional del Agua CONAGUA* (Bs.As., Argentina, 28-30 de Agosto de 2023). Buenos Aires: INA. p. 568. [Consulta: 7 de marzo de 2024]. Disponible en: <https://conagua.ina.gob.ar/archivos/Libro-resumenes-CONAGUA2023.pdf>
- Halac, S.; Mengo, L.; Guerra, L.; Lami, A.; Musazzi, S.; Loizeau, J. L.; Ariztegui, D. and Piovano, E. L., 2020. Paleolimnological reconstruction of the centennial eutrophication processes in a sub-tropical South American reservoir. En: *Journal of South American Earth Sciences*, 103, 102707. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102707>
- Harris, C.R.; Millman, K.J.; van der Walt, S.J.; Gommers, R.; Virtanen, P.; Cournapeau, D.; Wieser, E.; Taylor, J.; Berg, S.; Smith, N.J.; Kern, R.; Picus, M.; Hoyer, S.; van Kerkwijk, M.H.; Brett, M.; Haldane, A.; del Río, J.F.; Wiebe, M.; Peterson, P.; Gérard-Marchant, P.; Sheppard, K.; Reddy, T.; Weckesser, W.; Abbasi, H.; Gohlke, C. y Oliphant, T.E., 2020. *Array programming with NumPy*. *Nature*, 585(7825), pp. 357-362. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- Heng, L.; Jun, N.; Wen-jie, H. and Guibai, L., 2009. Algae removal by ultrasonic irradiation-coagulation. En: *Desalination*, 239(1-3), pp. 191-197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.12.035>
- Hunter, J.D., 2007. Matplotlib: A 2D graphics environment. En: *Computing in Science & Engineering*, 9(3), pp. 90-95. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- Jiaqi, Y.; Kevin, M.; Jiarong, H.; Miki, H., 2017. Temperature effects on growth and buoyancy of *Microcystis aeruginosa*. En: *Journal of Plankton Research*, 40(1), pp. 16-28.
DOI: <https://doi.org/10.1093/plankt/fbx059>
- Kibuye, F. A.; Zamyadi, A. y Wert, E. C., 2021. A critical review on operation and performance of source water control strategies for cyanobacterial blooms: Part II-mechanical and biological control methods. En: *Harmful Algae*, 109, 102119.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hal.2021.102119>
- Kieffer, L. A.; de la Sierra, P. M.; Devercelli, M.; Luna, J. A.; Claret, M. y Leiz, E., 2015. Ensayos en laboratorio para el control de floraciones algales mediante ultrasonido [En línea]. En: *Ciencia, Docencia y Tecnología*, 50, pp. 224-243. [Consulta: 30 de octubre de 2023]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5092631>
- Klapper, H., 1991. *Control of Eutrophication in Inland Waters*. Chichester: Ellis Horwood Limited. ISBN: 978-0-13-174830-9.
- Lomeo, D; Tebbs, E. J.; Babayani, N. D; Chadwick, M. A; Gondwe, M. J; Jungblut, A. D; McCulloch, G.P; Morgan, E.R.; Schillereff, D.N.; Simis, S.G.H. and Songhurst, A. C., 2024. Remote sensing and spatial analysis reveal unprecedented cyanobacteria bloom

- dynamics associated with elephant mass mortality. En: *Science of the Total Environment*, 957, 177525. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177525>
- Lürling, M.; Waajen, G. y de Senerpont Domis, L. N., 2016. Evaluation of several end-of-pipe measures proposed to control cyanobacteria. En: *Aquatic Ecology*, 50, pp. 499-519. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10452-015-9563-y>
- Lv, N.; Wu, R.; Guo, R.; Wu, L.; Zhang, H.; Guo, C.; Wu, L.; Zhang, H.; Guo, C. y Xu, J., 2024. Exploring the progress and challenges of ultrasonic technology in environmental remediation. En: *Ultrasonics Sonochemistry*, 107175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.107175>
- McKinney, W., 2010. *Data structures for statistical computing in Python* [En línea]. En: van der Walt, S. y Millman, J., eds. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*. Austin: s.n. pp. 51–56. [Consulta: 15 de junio de 2025]. Disponible en: <https://proceedings.scipy.org/articles/Majora-92bf1922-00a.pdf>
- Mehta, K.K.; Evitt, N. H. y Swartz, J. R., 2015. Chemical lysis of cyanobacteria. En: *Journal of Biological Engineering*, 9, pp.1-8. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13036-015-0007-y>
- Míguez, D., 2016. Tecnologías de control de floraciones de cianobacterias y algas nocivas en cuerpos de agua, con énfasis en el uso de irradiación por ultrasonido. En: *Innotec*, 12, pp. 54-61. DOI: <https://doi.org/10.26461/12.06>
- Prosperi, C., 2021. Importancia sanitaria y agronómica de los niveles tróficos de dos embalses de Córdoba (Argentina). En: *Revista de Ingeniería Química Agrícola y Alimentaria*, 1(1), pp. 06-12.
- Purcell, D., 2009. *Control of algal growth in reservoirs with ultrasound* [En línea]. Cranfield: Cranfield University. (Tesis de Doctorado). [Consulta: 6 de octubre de 2025]. Disponible en: <http://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/5204>
- Python Software Foundation, 2024. *Python: a programming language for general-purpose programming* [En línea]. Vers. 3.12.4. Wilmington, DE: Python Software Foundation. [Consulta: 15 de junio de 2025]. Disponible en: <https://www.python.org>
- Rajasekhar, P.; Fan, L.; Nguyen, T. y Roddick, F. A., 2012. A review of the use of sonication to control cyanobacterial blooms. En: *Water Research*, 46(14), pp. 4319-4329. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.054>
- Reichwaldt, E.S. y Ghadouani, A., 2012. Effects of rainfall patterns on toxic cyanobacterial blooms in a changing climate: between simplistic scenarios and complex dynamics. En: *Water Research*, 46(5), pp. 1372-1393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.052>
- Rodriguez-Molares, A.; Dickson, S.; Hobson, P.; Howard, C.; Zander, A. y Burch, M., 2014. Quantification of the ultrasound induced sedimentation of *Microcystis aeruginosa*. En: *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(4), pp. 1299-1304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.01.027>
- Romero, F. E.; Ferreyra, A.; Allende, M. J.; Gómez, M.; Vitulich, C. A.; Díaz, P. R.; Ojeda, G.; Marconi, G.; Amé, M.V; Mussi, C.; Baraibar, V; Mansur, P.; Rigatuso, A.; Fierro, J.; Martino, R.; Boccardi, L.; Halac, S.R.; Míguez, D. y Rodriguez, A., 2024. Análisis cuantitativo del porcentaje de vesículas de gas en células de *Microcystis* del Embalse San Roque (Córdoba, Argentina) tratadas con ultrasonido. En: *Innotec*, e665. DOI: <https://doi.org/10.26461/28.03>

- Seabold, S. y Perktold, J., 2010. *Statsmodels: Econometric and statistical modeling with Python* [En línea]. En: van der Walt, S. y Millman, J., eds. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*. Austin: s.n. pp. 92–96. [Consulta: 15 de junio de 2025].
Disponible en: <https://proceedings.scipy.org/articles/Majora-92bf1922-011.pdf>
- Sosa Benegas, G. R.; Fernandes Bernal, S. P.; Maia de Oliveira, V. y Zambrano Passarini, M. R., 2020. *Inibição do crescimento de *Microcystis Aeruginosa* e degradação da Cianotoxina Microcistina LR por extratos de microrganismos do continente antártico* [En línea]. Foz de Iguazú: Universidad Federal de Integración Latino-Americana. Instituto Latino-Americano de Ciencias de la Vida y de la Naturaleza. Programa de Posgrado en Biociencias. (Tesis de Maestría). [Consulta: 14 de junio de 2025].
Disponible en: <https://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/6029>
- Sukenik, A. y Kaplan, A., 2021. Cyanobacterial harmful algal blooms in aquatic ecosystems: A comprehensive outlook on current and emerging mitigation and control approaches. En: *Microorganisms*, 9(7), p. 1472.
DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms9071472>
- Tornabene, B. J.; Smalling, K. L. y Hossack, B. R., 2024. Effects of harmful algal blooms on amphibians and reptiles are under-reported and under-represented. En: *Environmental Toxicology and Chemistry*, 43(9), pp. 1936-1949. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.5941>
- Vaughan, L.; Barnett, D.; Bourke, E.; Burrows, H.; Robertson, F.; Smith, B.; Cashmore, J.; Welk, M.; Burch, M. y Zamyadi, A., 2023. Evaluating ultrasonicator performance for cyanobacteria management at freshwater sources. En: *Toxins*, 15(3), p. 186.
DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins15030186>
- Waskom, M., 2021. *Seaborn: statistical data visualization*. En: *Journal of Open Source Software*, 6(60), p. 3021. DOI: <https://doi.org/10.21105/joss.03021>
- Water Research Australia, 2015. *Ultrasound for the control of cyanobacteria*. Adelaide: Water Research Australia.
- Wert, E. C.; Dong, M. M. y Rosario-Ortiz, F. L., 2013. Using digital flow cytometry to assess the degradation of three cyanobacteria species after oxidation processes. En: *Water Research*, 47(11), pp. 3752-3761. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.04.038>
- Wetzel, R. G., 2001. *Limnology: lake and river ecosystems*. 3a ed. San Diego: Academic Press. ISBN: 978-0-12-744760-5.
- Yang, W.; Schmidt, C.; Wu, S.; Zhao, Z.; Li, R.; Wang, Z.; Wang, H.; Hua, P.; Krebs, P. y Zhang, J., 2025. Exacerbated anthropogenic water pollution under climate change and urbanization. En: *Water Research*, 280, p.123449.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123449>
- Yu, G.; Zhao, C.; Liu, B.; Li, Q. y Gao, H., 2013. Removal of algae from raw water by ultrasonic irradiation and flocculation: a pilot scale experiment. En: *Journal of Environmental Biology*, 34(2 suppl), p. 331. Disponible en: http://www.jeb.co.in/journal_issues/201304_apr13_supp/paper_07.pdf
- Zhang, G.; Zhang, P.; Wang, B. y Liu, H., 2006. Ultrasonic frequency effects on the removal of *Microcystis aeruginosa*. En: *Ultrasonics Sonochemistry*, 13(5), pp. 446-450.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ulstchonch.2005.09.012>

Relación entre los incendios forestales y la calidad del aire y las precipitaciones en el Área Metropolitana de Asunción, Paraguay

Relationship between forest fires and air quality and rainfall in the Metropolitan Area of Asunción, Paraguay

Relação entre incêndios florestais e qualidade do ar e precipitação na Área Metropolitana de Assunção, Paraguai

- ✉ DIANA DIEZ-PÉREZ-NÚÑEZ (1)
- ✉ ÁNGEL RINCÓN RODRÍGUEZ (2)
- ✉ ANALÍA SOLEDAD GAMARRA ROLÓN (1)
- ✉ AURA MICAELA MIRANDA GARCETE (1)
- ✉ BETARRAM CABALLERO (1)
- ✉ MARÍA CIELO NÚÑEZ FERREIRA (1)
- ✉ CLARA CANO (1)
- ✉ DORINA CATALINA FRUTOS MORALES (1)
- ✉ FRANCISCO ARZAMENDIA (1)
- ✉ LARISA MONSERRATH IBARRA AMARILLA (1)
- ✉ LARISSA ANTONELLA CORONEL RODRÍGUEZ (1)
- ✉ MAX ALEXANDER ROMERO ESPÍNOLA (1)
- ✉ MELISSA CAROLINA FIGUEREDO MENDOZA (1)
- ✉ NATASHA ANTONELLA BARRIOS CARRERA (1)
- ✉ SOFÍA DEL PILAR CHAMORRO CARDENAS (1)
- ✉ SOFÍA BELÉN LÓPEZ LÓPEZ (1)
- ✉ LUZ MARÍA T. ESCOBAR NÚÑEZ (1)
- ✉ CRISTIAN M. ARGÜELLO LLAMOSAS (1)
- ✉ MARCELO D. LÓPEZ BÁEZ (1)
- ✉ TOBÍAS M. LÓPEZ-RAMÍREZ (1)
- ✉ FÁTIMA J. BÁEZ VÁZQUEZ (1)
- ✉ JORGE A. BELOTTO (1)

(1) Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay.

(2) Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay.

RECIBIDO: 1/10/2025 → APROBADO: 28/11/2025 ✉ ddiezperez@qui.una.py

RESUMEN

Los incendios forestales provocan efectos adversos significativos en áreas urbanas y rurales. El objetivo de este estudio fue evaluar la influencia de los incendios forestales sobre la composición química del agua de lluvia y la calidad del aire en el Área Metropolitana de Asunción, Paraguay. Se recogieron muestras de agua de lluvia en septiembre y noviembre de 2024. Se analizaron pH, nitrato (NO_3^-) y sulfato (SO_4^{2-}) mediante métodos estandarizados. La calidad del aire se analizó de junio a diciembre de 2024, mediante sensores semiprofesionales. Los resultados no indicaron indicios de lluvia ácida ($\text{pH} < 5,6$). En septiembre, las concentraciones de nitrato ($11,92 \pm 4,98 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) y sulfato ($11,38 \pm 4,21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) fueron significativamente superiores ($p < 0,05$) a las registradas en noviembre ($3,78 \pm 5,55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y $4,33 \pm 3,14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), respectivamente, lo que sugiere una mayor presencia de precursores ácidos (NO_x y SO_2) en la atmósfera durante el periodo afectado por el incendio. La calidad del aire mostró concentraciones elevadas de $\text{PM}_{2,5}$, con picos críticos a principios de septiembre. Estos resultados subrayan la necesidad de una vigilancia atmosférica integrada y de políticas medioambientales específicas para mitigar los efectos de los incendios forestales en los ecosistemas urbanos y periurbanos.

Palabras clave: agua de lluvia, nitrato, sulfato, material particulado.

ABSTRACT

The forest fires cause significant adverse effects in urban and rural areas. The objective of the study was to evaluate the influence of forest fires on the chemical composition of rainwater and air quality in the Metropolitan Area of Asunción, Paraguay. Rainwater samples were collected in September and November 2024. pH, nitrate (NO_3^-) and sulfate (SO_4^{2-}) were analyzed using standardized methods. Air quality was analyzed from June to December 2024 using semi-professional sensors. The results indicated no evidence of acid rain ($\text{pH} < 5.6$). In September, nitrate ($11.92 \pm 4.98 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and sulfate ($11.38 \pm 4.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) concentrations were significantly higher ($p < 0.05$) than those recorded in November ($3.78 \pm 5.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $4.33 \pm 3.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), respectively, suggesting an increased presence of acid precursors (NO_x and SO_2) in the atmosphere during the fire-affected period. Air quality showed elevated concentrations of $\text{PM}_{2.5}$, with critical peaks in early September. These findings underscore the need for integrated atmospheric monitoring and targeted environmental policies to mitigate the effects of forest fires on urban and peri-urban ecosystems.

Keywords: rainwater, nitrate, sulfate, particulate matter.

RESUMO

Incêndios florestais causam efeitos adversos significativos em áreas urbanas e rurais. O objetivo deste estudo foi avaliar a influência dos incêndios florestais na composição química da água da chuva e na qualidade do ar na Região Metropolitana de Assunção,



Paraguai. Amostras de água da chuva foram coletadas em setembro e novembro de 2024. O pH, nitrato (NO_3^-) e sulfato (SO_4^{2-}) foram analisados usando métodos padronizados. A qualidade do ar foi analisada de junho a dezembro de 2024 usando sensores semiprofissionais. Os resultados não mostraram sinais de chuva ácida ($\text{pH} < 5,6$). Em setembro, as concentrações de nitrato ($11,92 \pm 4,98 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) e sulfato ($11,38 \pm 4,21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) foram significativamente maiores ($p < 0,05$) do que as registradas em novembro ($3,78 \pm 5,55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e $4,33 \pm 3,14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), respectivamente, sugerindo uma maior presença de precursores ácidos (NO_x e SO_2) na atmosfera durante o período de incêndios. A qualidade do ar apresentou concentrações elevadas de $\text{PM}_{2,5}$, com picos críticos no início de setembro. Esses resultados reforçam a necessidade de monitoramento atmosférico integrado e políticas ambientais direcionadas para mitigar os efeitos dos incêndios florestais nos ecossistemas urbanos e periurbanos.

Palavras-chave: água da chuva, nitrato, sulfato, material particulado.

INTRODUCCIÓN

Los bosques ofrecen una serie de beneficios ecológicos e hidrológicos fundamentales, como la mejora de la infiltración y la retención del agua. En muchos países en desarrollo, donde las comunidades rurales dependen de los bosques para su subsistencia, se han implantado estructuras alternativas de gobernanza forestal (Nasirzadehdizaji y Akyuz, 2022; Tadesse et al., 2022). Sin embargo, los incendios forestales provocan efectos adversos significativos sobre la estructura del suelo, reduciendo su capacidad de retención del agua e incrementando la erosión. También alteran la composición química del suelo y liberan grandes cantidades de contaminantes atmosféricos, incluyendo material particulado, gases traza y compuestos orgánicos volátiles (Nasirzadehdizaji y Akyuz, 2022).

La quema de bosques no solo constituye una fuente adicional difusa de elementos principales y trazas en el sistema suelo-sedimento-agua-planta, sino que también representa la forma más común de degradación de los bosques y sus ecosistemas, provocando una pérdida parcial o total de sus efectos positivos (Alexakis, 2020; Nasirzadehdizaji y Akyuz, 2022). Oduber et al. (2020) evidenciaron un incremento en las concentraciones de nitratos, sulfatos y otros componentes químicos debido al efecto de los incendios forestales en León, España. Además, en un análisis realizado por Dick y Schumacher (2019), en el Bioma Pampa (Brasil), se encontró que la quema de vegetación es responsable de la modificación de la composición química de la lluvia, incidente producto del aumento de las concentraciones de aniones como sulfato, cloruro y nitrato en la atmósfera. Por lo tanto, los incendios aumentan la carga de sedimentos, nutrientes, metales pesados, carbono orgánico disuelto (COD), nitratos en aguas superficiales (Pennino et al., 2022) y liberan mercurio en la atmósfera (Tuhý et al., 2020a y 2020b).

Los efectos de los incendios forestales trascienden los límites del ecosistema donde ocurren, ya que los contaminantes atmosféricos como los óxidos nitrosos, compuestos orgánicos volátiles, ozono, y material particulado, junto con al menos 20 tipos de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) reconocidos por la Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos (EPA), pueden transportarse largas distancias y afectar

la salud de las poblaciones (Wilgus y Merchant, 2024). Existe una asociación positiva entre la exposición a partículas finas ($PM_{2.5}$) de los incendios forestales y un aumento en la mortalidad y la morbilidad respiratoria (asma, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, bronquitis y neumonía) (Isley y Taylor, 2020; Wilgus y Merchant, 2024).

En Paraguay, al igual que en otros países sudamericanos, la quema de campos para limpieza en establecimientos ganaderos y rotación de forrajes es una práctica común. Durante períodos de extrema sequedad, el riesgo de incendios puede aumentar en un 69 %, con una mayor incidencia entre junio y noviembre (Lorenz Zimmermann et al., 2021; Molinas-González y Florentín, 2021). Sin embargo, los datos específicos sobre la ocurrencia de incendios forestales en Paraguay son limitados (Florentín y Ramírez, 2020), así como la evaluación de su impacto en la calidad del aire y la precipitación.

Entre los años 2001 y 2019, se registraron 41.812.746 ha de áreas quemadas en todo el país, siendo el año 2007 el que se destacó por tener la mayor cantidad de superficies quemadas (3.676.127,96 ha), mientras que en el 2017 fueron 3.274.669,25 ha y en el 2019, 2.387.687,94 ha (Florentín y Ramírez, 2020). En el 2019, los incendios forestales no solo afectaron a 12 de los 17 departamentos de Paraguay, sino también a varios países de Sudamérica (Irala et al., 2021). A raíz de dicho evento, Irala et al. (2021) destacan la relación entre los incendios forestales y el incremento de enfermedades respiratorias, subrayando la necesidad de contar con sistemas de vigilancia epidemiológica eficaces durante eventos ambientales extremos.

Ante los escasos o incipientes sistemas de monitoreo de la calidad del aire en el Paraguay, el análisis de iones como nitrato (NO_3^-) y sulfato (SO_4^{2-}), reconocidos marcadores de la contaminación atmosférica derivada de la combustión de biomasa, constituye una técnica ampliamente usada para rastrear el impacto de los incendios en la atmósfera y en los ecosistemas locales. En Paraguay, el estudio de caracterización de la composición del agua de lluvia durante la temporada de incendios forestales presenta una alternativa que permite evaluar el impacto de áreas extensas de manera económica, eficiente y científicamente validada para medir el impacto de los incendios forestales, complementar la vigilancia ambiental y ayudar a respaldar la necesidad de políticas públicas enfocadas en la prevención, el monitoreo y la mitigación de los efectos de estos eventos sobre la salud pública y el medio ambiente.

En este sentido, el presente trabajo busca establecer una relación entre la gran oleada de incendios forestales de septiembre de 2024 que afectaron la calidad del aire en varios países de Sudamérica (especialmente en Paraguay), con muestras de agua de lluvia recolectadas en el Área Metropolitana de Asunción en dicha temporada y el análisis de datos de una estación de monitoreo de material particulado ($PM_{2.5}$), situado en la ciudad de Asunción. El incendio masivo de unas 242.695 hectáreas en la región norte del Chaco paraguayo (frontera con Bolivia), que afectó la Reserva Natural del Cerro Chovoreca y 127.973 hectáreas en la Región Oriental (Instituto Forestal Nacional-INFONA, 2024), generaron partículas y gases contaminantes que se transportaron hasta aproximadamente 1.000 km, donde se localiza la capital del país, que incluso llevó al Ministerio de Salud Pública y Bienestar Social a emitir una alerta epidemiológica (Paraguay. Ministerio de Salud Pública y Bienestar Social - MSP y BS, 2024a).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se desarrolló en el Área Metropolitana de Asunción (AMA), Paraguay. Se seleccionaron quince (15) puntos de muestreo localizados en las viviendas de los estudiantes de la cátedra de Química Ambiental de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de Asunción del año 2024. Los puntos de muestreo fueron ubicados estratégicamente en las ciudades de Asunción, Luque, Fernando de la Mora, Lambaré, Mariano Roque Alonso, San Lorenzo, Capiatá, Ñemby y San Antonio, de tal manera a obtener un muestreo representativo. Si bien el AMA también abarca las ciudades de Limpio y Villa Elisa (Paraguay. MADES, PNUD y FMAM, 2019), no fue posible seleccionar puntos de muestreo en estas localidades. Para la evaluación de la calidad del aire, se han utilizado datos de la concentración de partículas finas ($PM_{2,5}$) registradas durante el segundo semestre del año 2024 por un sensor ubicado en la Embajada de Estados Unidos en Asunción, Paraguay (Av. Mariscal López y Av. Juscelino Kubitschek).

Colecta de muestras de agua

El muestreo de agua de lluvia se llevó a cabo en dos campañas. La primera se realizó en septiembre de 2024, mes en que el Ministerio de Salud Pública y Bienestar Social emitió una alerta epidemiológica debido al impacto de los incendios forestales (Paraguay. Ministerio de Salud Pública y Bienestar Social - MSP y BS, 2024a) y coincidiendo que la primera precipitación fue posterior a los incendios. La segunda campaña de muestreo tuvo lugar en noviembre de 2024, durante un periodo sin episodios de incendios forestales y luego de un periodo de incremento gradual de precipitaciones entre los meses de septiembre con 5,0 mm, octubre con 32,3 mm y noviembre con 55,4 mm (Paraguay. Dirección Nacional de Aeronáutica Civil- DINAC, 2024). Para la recolección de las muestras se utilizaron recipientes de Policloruro de Vinilo (PVC) de 2 litros, dispuestos al aire libre en zonas despejadas, alejados de árboles, cables, vegetación y animales (Chaves-Solano et al., 2021) y asegurados de manera de evitar su desplazamiento por acción del viento (Anexo 1). Una vez finalizadas las precipitaciones, los envases fueron sellados, etiquetados y almacenados en refrigeración hasta su traslado al laboratorio para su análisis. Es importante señalar que en ambas campañas los envases de muestreo se mantuvieron abiertos durante 24 h.

Análisis fisicoquímico del agua

En primer lugar, se midió con probeta o pipeta calibradas el volumen de agua recolectada en cada muestra, seguido de la medición del pH (Oakton 450, Estados Unidos). La concentración de nitrato se determinó midiendo la absorbancia por espectrofotometría UV-VIS (Genesys 10S ThermoScientific, Estados Unidos), según el método EPA 352.1 (U.S. Environmental Protection Agency, 1971); y la concentración de sulfato se determinó mediante el método 4500- SO_4^{2-} (American Public Health Association, 2017). Todos los equipos fueron previamente calibrados, los métodos analíticos fueron verificados, y se

realizaron curvas de calibración para garantizar la confiabilidad de los resultados. Para el análisis estadístico se empleó el software SPSS (IBM Corp., 2017). Se calcularon la media y la desviación estándar de los parámetros analizados, y se aplicó la prueba no paramétrica de U-Mann Whitney para comparar los resultados obtenidos entre ambas campañas de muestreo.

Datos de calidad del aire

Los datos de calidad del aire corresponden a mediciones de concentración de partículas finas ($PM_{2,5}$) registradas por un sensor ubicado en la Embajada de Estados Unidos en Asunción, Paraguay (World Air Quality Index Project, 2008). La estación pertenece a la iniciativa World Air Quality Index Project (2008) para el monitoreo de calidad del aire a nivel mundial mediante sensores semiprofesionales GAIA, diseñados por los laboratorios Earth Sensing y avalados por agencias de protección ambiental internacionales (Earth Sensing Labs, s.d.). Se han determinado registros horarios y se han calculado los valores mínimos, máximos, mediana, primer cuartil (q1), tercer cuartil (q3) y desviación estándar (stdev) para cada día del segundo semestre del 2024 (junio a diciembre) que corresponde al periodo de estudio. Las concentraciones de material particulado se utilizan para determinar la evolución de la calidad del aire durante los meses de recolección de agua de lluvia analizados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Volumen de agua recogida en las campañas de muestreo

El volumen de agua pluvial recolectado no fue homogéneo en el Área Metropolitana de Asunción (AMA), como se muestra en la Tabla 1. En septiembre se colectó el agua de lluvia en el 80 % de los puntos de muestreo establecidos (12 de 15), mientras que en el mes de noviembre esta cifra disminuyó al 67 % (10 de 15). En la Figura 1 se visualiza que durante el mes de septiembre los mayores volúmenes de agua (> 50 mL) se registraron en los puntos P5 y P11. A partir de allí, los volúmenes fueron disminuyendo progresivamente hacia el noreste, hasta no registrarse precipitaciones en los puntos P2, P6 y P10. En cambio, en el mes de noviembre, las mayores precipitaciones se registraron en el centro-norte del AMA, con volúmenes de 224 mL en el punto P13 y 630 mL, en el punto P5, mientras que al sur no se registraron precipitaciones.

TABLA 1. Volumen (mL) de agua recogido en ambas campañas de muestreo.

Mes	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Septiembre	12	2,5	113,0	27,9	34,4
Noviembre	10	0,2	630,0	131,5	188,3



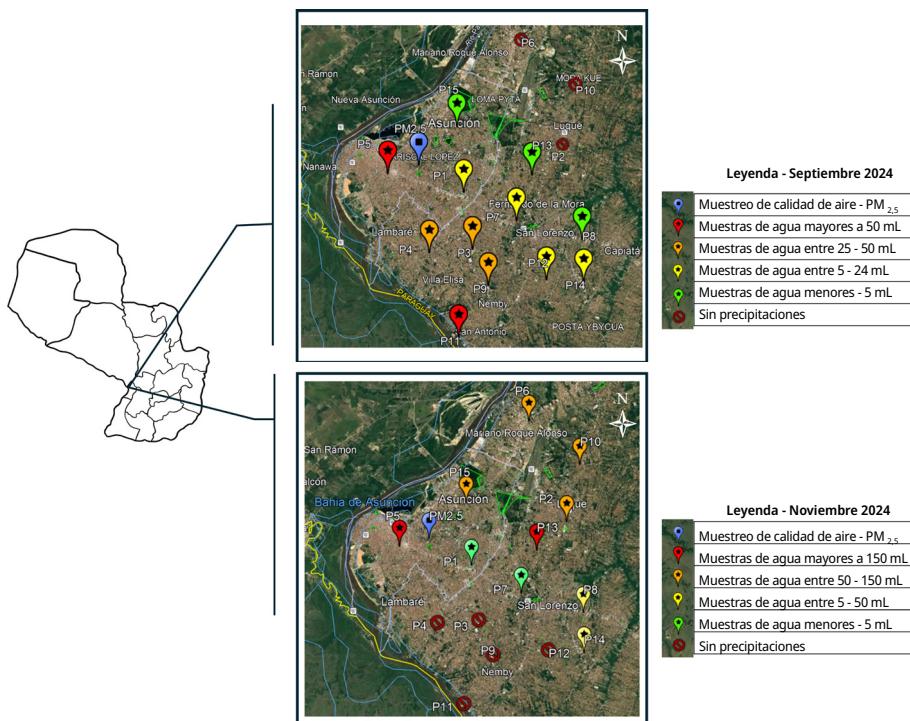


FIGURA 1. Puntos de muestreo de agua de lluvia y calidad del aire del Área Metropolitana de Asunción (AMA). La variación de colores de los puntos de muestreo se relaciona con el volumen de agua de lluvia recogida en las campañas de septiembre y noviembre (Google LLC, 2024).

El volumen de agua recolectado durante ambas campañas de muestreo fue ligeramente inferior a los registros de precipitaciones proporcionados por la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC): septiembre/2024, 5 mm y noviembre/2024, 55,4 mm (Paraguay. Dirección Nacional de Aeronáutica Civil- DINAC, 2024). Como se muestra en el Anexo 5, el promedio de precipitaciones en el presente estudio fue de 3,55 mm en septiembre y de 16,74 mm en noviembre.

Esta variabilidad espacial podría atribuirse a la distribución irregular de las precipitaciones y a efectos locales como la topografía, las corrientes de aire y las fuentes urbanas de calor. Como consecuencia, la insuficiencia de volumen en algunos puntos limitó la posibilidad de realizar análisis fisicoquímicos completos y repeticiones de los ensayos para cálculos de incertidumbre, lo que introduce una restricción en la representatividad espacial de los resultados para ciertas zonas del AMA.

Calidad del agua de las precipitaciones

Como se observa en la Tabla 2 y la Figura 2, durante la primera campaña de muestreo, correspondiente al mes de septiembre, el valor medio del pH registrado en las precipitaciones fue de $6,85 \pm 0,31$ UpH, ligeramente inferior al registrado durante la segunda campaña en noviembre, que alcanzó un valor medio de $7,22 \pm 0,56$ UpH. A pesar

de esta aparente disminución del pH durante el primer periodo, los resultados del análisis estadístico no revelaron una diferencia significativa entre ambos periodos (prueba U de Mann-Whitney, $p = 0,075$), lo cual indica que desde un punto de vista estadístico no puede atribuirse con certeza una variación sustancial del pH entre las dos campañas.

Esta leve disminución del pH en septiembre podría estar asociada a la mayor frecuencia e intensidad de los incendios forestales y de pastizales, así como la quema de campos para la rotación de forrajes y limpieza en establecimientos ganaderos (Anexo 2) que se caracterizan por ser prácticas comunes en el Paraguay (Molinás-González y Florentín, 2021), acompañado de la estación seca en el Área Metropolitana de Asunción (AMA). Durante estos eventos, la combustión de biomasa emite precursores ácidos como dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x), que pueden reaccionar en la atmósfera con el vapor de agua para formar ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3), los cuales tienden a acidificar el agua de lluvia. Sin embargo, la concentración de estos compuestos ácidos durante el primer periodo no fue suficiente para superar la capacidad amortiguadora natural de la atmósfera o del propio sistema de captación de lluvia, lo que evitó una reducción crítica del pH.

Cabe señalar que en ningún momento los valores registrados descendieron por debajo del umbral convencional de 5,6 UpH, límite generalmente aceptado para definir episodios de lluvia ácida (Bini y Bresolin, 1998). Tal como se muestra en la Figura 2, la diferencia en los valores medios de pH entre septiembre y noviembre se representa visualmente por encima de esta línea de referencia (indicada en rojo punteado). Por lo tanto, a pesar de la presencia de emisiones contaminantes derivadas de la quema de biomasa, las precipitaciones analizadas no alcanzaron condiciones de acidez atmosférica crítica.

Este hallazgo tiene implicancias ambientales relevantes para la región del AMA. El mantenimiento de un pH cercano a la neutralidad en el agua de lluvia sugiere una relativa resiliencia del sistema atmosférico local frente a episodios de contaminación transitoria. En consecuencia, se minimizan riesgos potenciales como la acidificación del suelo, la lixiviación de cationes esenciales (Ca^{2+} , mg^{2+} , K^+) o la afectación de procesos ecológicos clave como la germinación de semillas y la absorción de nutrientes, fenómenos particularmente sensibles en los entornos agrícolas urbanos y periurbanos, de los cuales dependen muchas familias del AMA para su sustento alimentario (Zhang, 2023).

TABLA 2. Resultados del análisis del agua de lluvia recogida en el Área Metropolitana de Asunción en septiembre y noviembre de 2024.

Código	Ciudad	Septiembre			Noviembre		
		pH (UpH)	NO ₃ ⁻ (mg·L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ (mg·L ⁻¹)	pH (UpH)	NO ₃ ⁻ (mg·L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ (mg·L ⁻¹)
P1	Asunción	6,04	13,44†	**	**	**	**
P2	Luque	**	**	**	6,39	2,12 ± 0,12	2,41‡
P3	Fernando de la Mora	6,86	12,06†	17,45‡	**	**	**
P4	Lambaré	7,02	4,64‡	8,63‡	**	**	**
P5	Asunción	7,26	8,85†	12,74‡	7,38	2,17 ± 0,36	2,74‡
P6	Mariano Roque Alonso	**	**	**	7,25	2,23 ± 0,57	2,62‡
P7	San Lorenzo	6,93	14,21†	**	**	24,40‡	**
P8	Capiatá	6,74	19,86†	**	7,90	3,53 ± 0,47	10,73‡
P9	Ñemby	6,92	8,11‡	11,63‡	**	**	**
P10	Luque	**	**	**	7,66	2,83‡	5,16‡
P11	San Antonio	7,09	2,67‡	6,43‡	**	**	**
P12	San Lorenzo	7,02	15,74†	**	**	**	**
P13	San Lorenzo	**	16,17†	**	6,39	1,41 ± 0,09	1,44‡
P14	Capiatá	6,71	13,20†	**	7,53	1,93 ± 0,37	5,07‡
P15	Asunción	6,81	14,16†	**	7,23	3,16 ± 0,21	2,87‡
Media		6,85	11,92	11,38	7,22	3,78	4,33
Desviación estandar		0,31	4,98	4,21	0,56	5,55	3,14

** El volumen de agua recogido no permitió determinar el parámetro.

† El volumen de agua recogido no fue suficiente para determinar el parámetro por duplicado.



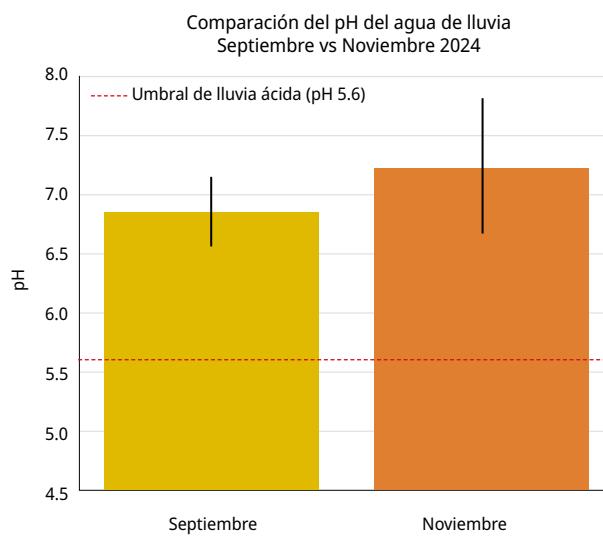


FIGURA 2. Comparación del pH del agua de lluvia en el Área Metropolitana de Asunción (Fuente: elaboración propia).

Con relación a la composición química de las precipitaciones, el análisis de los aniones secundarios reveló diferencias estadísticamente significativas entre las dos campañas de muestreo, particularmente en las concentraciones de nitrato (NO_3^-) y sulfato (SO_4^{2-}) (prueba U de Mann-Whitney, $p < 0,05$). Durante septiembre, se registraron concentraciones notablemente superiores para ambos aniones ($11,92 \pm 4,98 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para NO_3^- y $11,38 \pm 4,21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para SO_4^{2-}), en comparación con noviembre ($3,78 \pm 5,55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y $4,33 \pm 3,14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectivamente). Este patrón coincide con el periodo de mayor actividad de incendios forestales y quema de biomasa en el norte del Chaco Paraguayo y de la Región Oriental, lo que respalda la hipótesis de que los eventos de combustión de materia orgánica son fuentes relevantes de estos compuestos en la atmósfera local.

A pesar de que las precipitaciones registradas en noviembre fueron superiores a las de septiembre (Anexo 5), no se encontró una diferencia significativa entre ambas campañas de muestreo (U de Mann-Whitney, $p = 0,086$). El Anexo 3 presenta la relación entre las concentraciones de iones con el volumen de agua recolectada. Si bien en varios puntos de muestreo se observó que la concentración de iones tendía a ser mayor cuando el volumen era menor, esta tendencia no fue consistente en todos los casos analizados.

Es importante destacar que en noviembre la concentración de nitrato se mantuvo por debajo de 5 mg/L, a pesar de las variaciones en el volumen de agua recolectada, salvo en el punto P7, donde se registró una concentración de 24,40 mg/L.

Las concentraciones elevadas pueden explicarse por la oxidación de gases precursores emitidos durante la quema —específicamente, NO_x y SO_2 — que forman ácido nítrico y ácido sulfúrico, los cuales se disocian en el agua de lluvia como NO_3^- y SO_4^{2-} , respectivamente. Por lo tanto, el aumento en la carga iónica de estos aniones durante septiembre sugiere una mayor eficiencia en la incorporación de especies ácidas al ciclo hidrológico, a pesar de que el pH se mantuvo por encima del umbral de lluvia ácida. Esta aparente contradicción puede explicarse por la capacidad amortiguadora del sistema, o bien por limitaciones en la concentración de protones libres (H^+) debido a la neutralización

parcial con iones básicos presentes en el polvo o en la lluvia (como Ca^{2+} , mg^{2+} o NH_4^+), fenómeno común en sistemas atmosféricos continentales influenciados por emisiones mixtas.

La Figura 3 evidencia las concentraciones medias de nitrato (NO_3^-) y sulfato (SO_4^{2-}) en las lluvias recolectadas en el AMA en septiembre y noviembre de 2024, con barras de error que representan la desviación estándar. Se muestra una mayor concentración media de ambos aniones en septiembre junto con una dispersión moderada, lo que es consistente con una fuente puntual y significativa (incendios forestales). En contraste, en noviembre, aunque las concentraciones medias fueron menores, la variabilidad fue mayor, como lo reflejan las barras de error más largas. Esta dispersión puede deberse a factores complementarios como la heterogeneidad espacial de las fuentes antropogénicas, el tráfico vehicular en avenidas altamente transitadas cercanas a algunos puntos de muestreo, y las cambiantes condiciones meteorológicas que podrían haber influido en la concentración local de contaminantes a través de procesos de dispersión, deposición seca y dinámica atmosférica inestable. Mientras que los incendios forestales explican el aumento sostenido de los aniones durante septiembre, la dispersión en noviembre sugiere una influencia más localizada y heterogénea, posiblemente modulada por fuentes móviles y condiciones meteorológicas fluctuantes.

Adicionalmente, la Figura 4 muestra que las mayores concentraciones de nitrato y sulfato se registraron en el noreste del área de estudio, un patrón espacial que puede explicarse por la interacción entre dos factores clave: i) localización de los focos de incendios en el norte del país, lo que sugiere una fuente de emisiones significativa procedente de esa dirección, ii) vientos predominantes del norte y este hacia el AMA (Anexo 3a), que favorecen el transporte de contaminantes (tonos azules y verdes del Anexo 3a entre las 6 y 18 h durante septiembre), promoviendo una acumulación relativa de contaminantes en esa franja geográfica (© WeatherSpark.com, 2025).

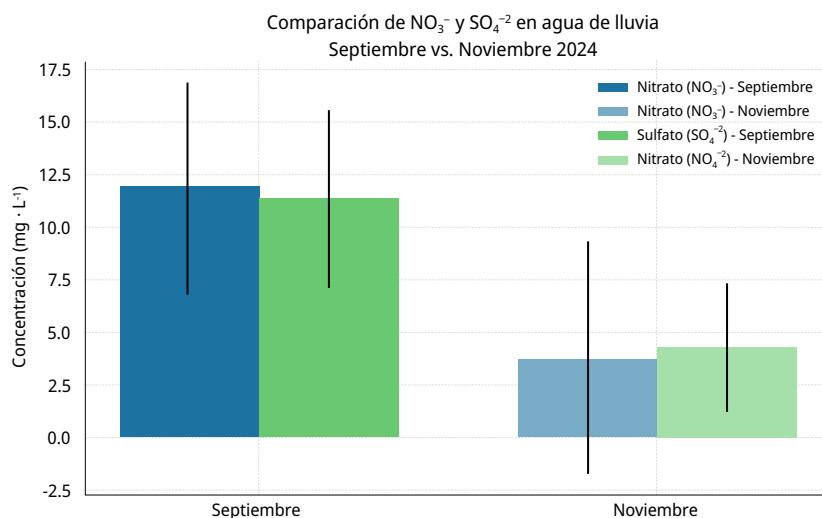


FIGURA 3. Concentración media de NO_3^- y SO_4^{2-} ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) en muestras de agua de lluvia recolectadas en septiembre y noviembre de 2024 en el Área Metropolitana de Asunción. Las barras indican la media \pm desviación estándar. Se observan diferencias

estadísticamente significativas entre ambas campañas de muestreo ($p < 0,05$; prueba U de Mann-Whitney), especialmente en el mes de septiembre, posterior a los incendios forestales (Fuente: elaboración propia).

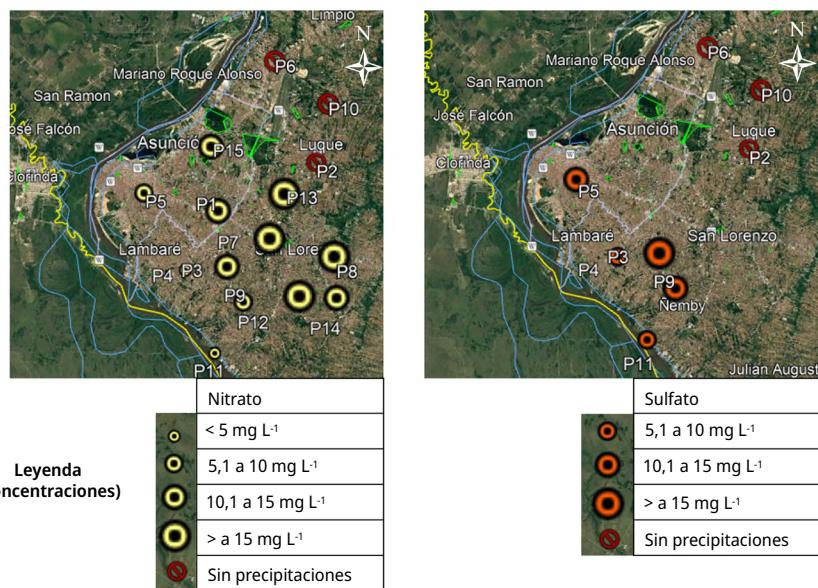


FIGURA 4. Distribución espacial de las concentraciones de nitrato y sulfato en el AMA durante la campaña de septiembre, correspondiente a la primera precipitación luego de los incendios forestales registrados (Google Earth, 2024).

En paralelo, las mayores precipitaciones registradas al sur durante el mismo periodo podrían haber causado un efecto de dilución atmosférica, reduciendo así las concentraciones locales de aniones en las muestras del sur. Este fenómeno es coherente con estudios previos que demuestran cómo las lluvias intensas actúan como mecanismos de “lavado atmosférico”, disminuyendo transitoriamente la carga contaminante. El agua de lluvia y el agua de niebla cumplen un rol fundamental en la limpieza atmosférica (Mora et al., 2021).

Estos resultados apuntan a una mayor carga atmosférica de compuestos acidificantes y oxidantes durante septiembre, en concordancia con la presencia de incendios forestales en el norte del Chaco Paraguayo y norte de la Región Oriental (Paraguay. Ministerio de Salud Pública y Bienestar Social - MSP y BS, 2024b). La elevación simultánea de nitrato (NO_3^-) y sulfato (SO_4^{2-}) en las precipitaciones de septiembre, en conjunto con una baja dispersión estadística, no solo sugiere una fuente común dominante sino que además apunta a una atmósfera más homogéneamente influenciada por un único proceso de combustión extensiva, que aportó de forma masiva y sostenida los gases precursores NO_x y SO_2 .

La menor dispersión en las concentraciones durante septiembre implica una atmósfera relativamente estable en cuanto a la distribución espacial de estos compuestos, lo cual también sugiere condiciones meteorológicas más uniformes, como una baja

velocidad del viento (predominante brisa suave y moderada entre 4 y 8 m/s en los tonos verdes claros del Anexo 4b), ausencia de precipitaciones previas (pocas nubes mostradas por un exceso del tono rosado del Anexo 4c) que pudieran haber removido los contaminantes antes del evento de lluvia muestreado. Este tipo de estabilidad favorece la acumulación y deposición de los productos de oxidación atmosférica.

En cambio, noviembre se caracterizó por una mayor heterogeneidad en la concentración de estos aniones, lo que puede atribuirse a múltiples factores urbanos y meteorológicos, como cambios en la dirección del viento (tonos predominantemente marrones que indican dirección sur del Anexo 4a), precipitaciones intermitentes o fenómenos de inversión térmica localizados que alteran la dinámica de mezcla de contaminantes en el aire (notable incremento de la nubosidad en tonos grises del Anexo 4c). Esta dispersión también puede estar vinculada a la diversidad de fuentes emisoras en entornos urbanos como, por ejemplo, la quema de combustibles fósiles por vehículos y generadores, emisiones industriales, y actividades residenciales como cocción o calefacción que, aunque constantes, no presentan la intensidad espacialmente concentrada de un evento de quema masiva de vegetación. La superposición de emisiones de NO_x y SO₂ de origen antropogénico urbano pudo haber reforzado la carga total de precursores atmosféricos, especialmente en zonas del AMA cercanas a avenidas, áreas comerciales o industriales. Este efecto sinérgico entre fuentes rurales y urbanas, característico de las atmósferas mixtas de regiones metropolitanas en países en desarrollo, muestran una fuerte influencia estacional de los patrones de contaminación y también una complejidad espacial ligada a usos del suelo, infraestructura y movilidad.

Concentración de partículas finas en AMA para el periodo de muestreo

La Figura 5 muestra la evolución temporal de la mediana estimada a partir de los datos horarios de PM_{2,5} (en µg/m³) desde el 1 de junio hasta el 31 de diciembre de 2024. La línea horizontal roja discontinua señala el límite diario de 30 µg/m³ establecido por el Ministerio del Ambiente (Paraguay. Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible-MADES, 2015). Se destacan en rojo los días en que se superó este umbral, considerados como días críticos. Se sombrean en naranja los meses de septiembre y noviembre, los cuales representan los períodos de muestreo de agua de lluvia.

Durante septiembre se observa un marcado incremento de las concentraciones de partículas finas en el aire de Asunción durante la primera mitad del mes, especialmente entre los días 9 y 11 de septiembre donde se alcanzaron picos de 132 y 115 µg/m³, que superan hasta en más de 4 veces el valor límite. Esta situación coincide con los eventos de incendios forestales en el norte del país, lo que confirma su influencia directa en la calidad del aire del AMA. Por otra parte, en noviembre no se detectan picos significativos pronunciados, lo que sugiere que si bien no hay influencia directa de los incendios forestales persisten fuentes urbanas de emisión, como el tráfico vehicular, la quema de residuos y las actividades industriales.

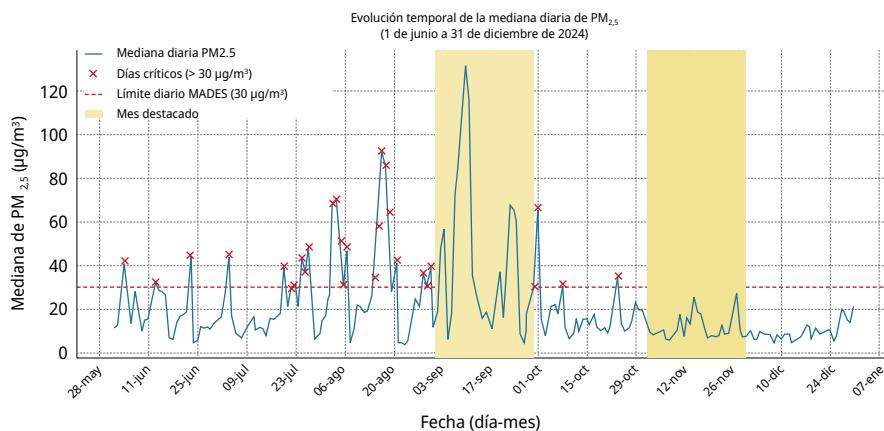


FIGURA 5. Evolución de la concentración de material particulado fino-PM_{2,5} desde el 1 de junio hasta el 31 de diciembre de 2024 en el Área Metropolitana de Asunción. Los puntos rojos indican los días donde se superan los límites de la norma del MADES y las áreas sombreadas en naranja, resaltan los meses de septiembre y noviembre, en donde se tomaron las muestras de agua de lluvia (Fuente: World Air Quality Index Project, 2008).

CONCLUSIONES

Este estudio permitió analizar la relación entre la calidad del agua de lluvia y la calidad del aire en el Área Metropolitana de Asunción (AMA), a partir de dos campañas de muestreo realizadas en septiembre y noviembre de 2024, representativas de condiciones atmosféricas contrastantes. La primera campaña coincidió con una alta incidencia de incendios forestales en el norte del país, mientras que la segunda se desarrolló en un periodo posterior, caracterizado por la ausencia de eventos de quema de biomasa forestal y aumento de precipitaciones.

Los resultados evidencian una correlación entre los episodios de quema de biomasa y la composición química de las precipitaciones en el AMA. En septiembre, se registraron concentraciones significativamente elevadas de partículas finas (PM_{2,5}), así como de aniones secundarios de nitrato (NO₃⁻) y sulfato (SO₄²⁻) en el agua de lluvia, en comparación con noviembre. Este patrón sugiere que los incendios, aunque ocurridos a una distancia de aproximadamente 1000 km, ejercieron un efecto regional de largo alcance sobre la atmósfera del AMA, reforzando el papel de estos eventos como fuentes difusas y extensas de contaminantes acidificantes.

El enriquecimiento en nitratos y sulfatos se relaciona con la emisión de óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO₂), productos típicos de la combustión de biomasa. Estos compuestos gaseosos fueron transformados por reacciones fotoquímicas y procesos oxidativos mediante radicales hidroxilo y peróxidos en ácido nítrico (HNO₃) y ácido sulfúrico (H₂SO₄), los cuales se disolvieron fácilmente en el vapor de agua atmosférico y se disociaron posteriormente en las precipitaciones.

La mayor concentración y baja variabilidad espacial de estos aniones en septiembre indican una fuente dominante común, reforzada por condiciones meteorológicas estables que favorecieron la acumulación y deposición húmeda de estos contaminantes.

A pesar del aumento en la concentración de compuestos acidificantes, el pH de las precipitaciones se mantuvo por encima del umbral considerado como lluvia ácida, lo que sugiere que los procesos de neutralización atmosférica (posiblemente por presencia de amonio o partículas alcalinas) fueron suficientes para amortiguar la acidez generada por los precursores ácidos. Por lo tanto, si bien no se evidenció una acidificación significativa de las precipitaciones, la presencia elevada de nitratos y sulfatos constituye un factor de riesgo ambiental dado que estos aniones pueden alterar la química del suelo, favorecer la lixiviación de nutrientes esenciales e impactar negativamente en la productividad agrícola y en los ecosistemas urbanos y periurbanos.

En este contexto, los resultados obtenidos destacan la importancia de implementar sistemas de monitoreo continuo de la calidad del aire y del agua de lluvia en entornos urbanos y periurbanos potencialmente afectados por incendios forestales, tanto locales como de origen remoto. Dichos sistemas permitirían no solo una mejor comprensión de la dinámica estacional y espacial de los contaminantes atmosféricos, sino también una respuesta oportuna ante episodios de quema extensiva de biomasa. Asimismo, constituyen una herramienta clave para el diseño e implementación de políticas públicas orientadas a la prevención, mitigación y adaptación frente a los impactos ambientales derivados de la contaminación atmosférica, especialmente en regiones como el AMA, donde las comunidades dependen de los servicios ecosistémicos para su subsistencia y bienestar.

REFERENCIAS

- Alexakis, D. E., 2020. Suburban areas in flames: dispersion of potentially toxic elements from burned vegetation and buildings. Estimation of the associated ecological and human health risk. En: *Environmental Research*, 183, 109153. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109153
- American Public Health Association, 2017. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23a ed. Washington DC: APHA. Standard Method 4500-SO₄⁻².
- Bini, C. y Bresolin, F., 1998. Soil acidification by acid rain in forest ecosystems: a case study in northern Italy. En: *Science of the Total Environment*, 222(1–2), pp. 1–15. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(98\)00239-3](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(98)00239-3)
- Chaves-Solano, K. D.; Sibaja-Brenes, J. P. y Pérez-López, E., 2021. Monitoreo de la concentración de SO₂ en el aire y características fisicoquímicas del agua de lluvia en el Volcán Irazú. En: *Revista Tecnología en Marcha*, 34(4), pp. 146–162. DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v34i4.5113>
- Dick, G. y Schumacher, M., 2019. Vegetation burning in pampa biome altered the chemical composition of rainfall. En: *Floresta Ambient.*, 26(3), pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.039018>
- Earth Sensing Labs, s.d. *GAIA Air Quality Sensors. Developed by Earth Sensing Laboratories and validated by international environmental protection agencies*. [s.l.]: Earth Sensing Labs. [Consulta: 1 de julio de 2025]. Disponible en: <https://aqicn.org/gaia/list/>
- Florentín Díaz, P. Á. y Ramírez, A., 2020. *Análisis de la ocurrencia de incendios forestales y su relación con el fenómeno climático de El Niño – Oscilación Sur (ENOS) en el Paraguay*

- 2001-2019 [En línea]. Asunción: FDP. [Consulta: 30 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://repositorio.conacyt.gov.py/bitstream/handle/20.500.14066/3530/Maestría-BNAC09-72.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Google LLC, 2024. *Google Earth Pro*. Vers. 7.3.6. California: Keyhole Inc. [Consulta: 1 September 2024]. Disponible en: <https://www.google.com/earth/versions/#earth-pro>
- IBM Corp., 2017. *IBM SPSS Statistics for Windows*. Vers. 25.0. New York: IBM Corp.
- Instituto Forestal Nacional-INFONA, 2024. *INFONA revela datos de afectación por incendios forestales de los meses de septiembre y octubre*. [En línea]. Asunción: INFONA. [Consulta: 30 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://infona.gov.py/infona-revela-datos-de-afectacion-por-incendios-forestales-de-los-meses-de-septiembre-y-octubre/>
- Irala S.; Arellano M.; Vázquez F.; Peralta K. y Pedrozo M.E., 2021. Vigilancia intensificada de enfermedades durante los incendios forestales, Paraguay, 2019. En: *Memorias del Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Salud*, 19(3), pp. 25-34. DOI: <http://dx.doi.org/10.18004/mem.iics/1812-9528/2021.019.03.25>
- Isley, C. F. y Taylor, M. P., 2020. Atmospheric remobilization of natural and anthropogenic contaminants during wildfires. En: *Environmental Pollution*, 267, 115400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115400>
- Lorenz Zimmermann, L. N.; Eisenkölbl Closs, A. R. y Amarilla Rodríguez, S. M., 2021. Dinámica de incendios forestales en la Reserva para Parque Nacional San Rafael, Paraguay, periodo 2007-2017. En: *Revista de La Sociedad Científica Del Paraguay*, 26(1), pp. 17-34. DOI: <https://doi.org/10.32480/rscp.2021.26.1.17>
- Molinas-González, C. R. y Florentín, P., 2021. Incendios forestales en Paraguay: implicaciones para su prevención y manejo. En: *Investigaciones y Estudios - UNA*, 12(1), pp. 47-57. DOI: <https://doi.org/10.47133/ieuna2115>
- Mora, J.; Sibaja, J. y Borbón, H., 2021. Fuentes antropogénicas y naturales de contaminación atmosférica: estado del arte de su impacto en la calidad fisicoquímica del agua de lluvia y de niebla. En: *Revista Tecnología En Marcha*, 34(1), pp. 92-103. DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.4806>
- Nasirzadehdizaji, R. y Akyuz, D. E., 2022. Predicting the potential impact of forest fires on runoff and sediment loads using a distributed hydrological modeling approach. En: *Ecological Modelling*, 468, 109959. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.109959>
- Oduber F.; Calvo A. I.; Castro A.; Blanco-Alegre C.; Alves C.; Barata J.; Nunes T.; Lucarelli F.; Nava S.; Calzolai G.; Cerqueira M.; Martín-Villacorta J.; Esteves V. y Fraile R., 2020. Chemical composition of rainwater under two events of aerosol transport: A Saharan dust outbreak and wildfires. En: *Sci Total Environ.*, 734, 139202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139202>
- Paraguay. Dirección Nacional de Aeronáutica Civil- DINAC, 2024. *Anuario climatológico 2024*. [En línea]. Asunción: CRJ. [Consulta: 02 de julio de 2025]. Disponible en: https://www.meteorologia.gov.py/wp-content/uploads/2025/06/anuario_final_2024.pdf
- Paraguay. Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible- MADES, 2015. *Resolución N° 259/2015. Por la cual se establece parámetros permisibles de calidad del aire*. Asunción: MADES.
- Paraguay. Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible- MADES; PNUD y FMAM, 2019. *Guía de arborización urbana para el área metropolitana de Asunción. Proyecto*

- "Asunción Ciudad Verde de las Américas - Vías a la Sustentabilidad". [En línea]. Asunción: MADES. [Consulta: 9 de diciembre de 2024]. Disponible en: <https://www.mades.gov.py/2019/03/27/guia-de-arborizacion-urbana/>
- Paraguay. Ministerio de Salud Pública y Bienestar Social-MSP y BS, 2024a. *Alerta epidemiológica N° 2*. [En línea]. Asunción: MSP y BS. [Consulta: 02 de julio de 2025]. Disponible en: https://dgvs.mspbs.gov.py/wp-content/uploads/2025/03/Alerta_Epidemiologica_Nro.2_2024_Incendios_Forestales-final.pdf
- Paraguay. Ministerio de Salud Pública y Bienestar Social- MSP y BS, 2024b. *Resumen de Eventos Ambientales*. [En línea]. Asunción: MSP y BS. [Consulta: 02 de julio de 2025]. Disponible en: https://dgvs.mspbs.gov.py/wp-content/uploads/2024/09/24092024_Incendio-Forestal-MSPBS.pdf
- Pennino, M. J.; Leibowitz, S. G.; Compton, J. E.; Beyene, M. T. y LeDuc, S. D., 2022. Wildfires can increase regulated nitrate, arsenic, and disinfection byproduct violations and concentrations in public drinking water supplies. En: *Science of the Total Environment*, (804), 149890. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149890>
- Tadesse, T.; Teklay, G.; Mulatu, D. W.; Rannestad, M. M.; Meresa, T. M. y Woldelibanos, D., 2022. Forest benefits and willingness to pay for sustainable forest management. En: *Forest Policy and Economics* (138), pp. 1-9 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2022.102721>
- Tuhý, M.; Rohovec, J.; Matoušková, Š.; Mihaljevič, M.; Kříbek, B.; Vaněk, A.; Mapani, B.; Göttlicher, J.; Steininger, R.; Majzlan, J. y Ettler, V., 2020a. The potential wildfire effects on mercury remobilization from topsoils and biomass in a smelter-polluted semi-arid area. En: *Chemosphere*, (247). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125972>
- Tuhý, L.; Ettler, V.; Mihaljevič, M.; Vaněk, A. y Komárek, M., 2020b. Wildfires as a source of mercury contamination in the environment: a critical review. En: *Environmental Pollution*, (265). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114849>
- U.S. Environmental Protection Agency, 1971. *Method 352.1: nitrogen, nitrate (colorimetric, brucine) by spectrophotometer*. Washington, D.C.: USEPA. [Consulta: 1 September 2024]. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/method_352-1_1971.pdf
- © WeatherSpark.com, 2025. *Datos históricos meteorológicos de setiembre de 2024 en Asunción Paraguay* [En línea]. Minneapolis: © Cedar Lake Ventures, Inc. [Consulta: 02 de julio de 2025]. Disponible en: <https://es.weatherspark.com/h/m/29167/2024/9/Tiempo-hist%C3%83rico-en-septiembre-de-2024-en-Asunci%C3%83n-Paraguay#Figures-Temperature>
- Wilgus, M. L. y Merchant, M., 2024. Clearing the air: understanding the impact of wildfire smoke on asthma and COPD. En: *Healthcare*, 12(307). pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/healthcare12030307>
- World Air Quality Index Project, 2008. *Asuncion US Embassy, Paraguay Air Pollution: Real-time Air Quality Index (AQI)* [En línea]. [s.l.]: World Air Quality Index Project. [Consulta: 2 de julio de 2025]. Disponible en: <https://aqicn.org/station/paraguay-asuncion-us-embassy/>
- Zhang, L., 2023. Effects of acid rain on forest organisms and countermeasures. En: *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 69, pp. 292–298. DOI: <https://doi.org/10.54097/hset.v69i.12041>

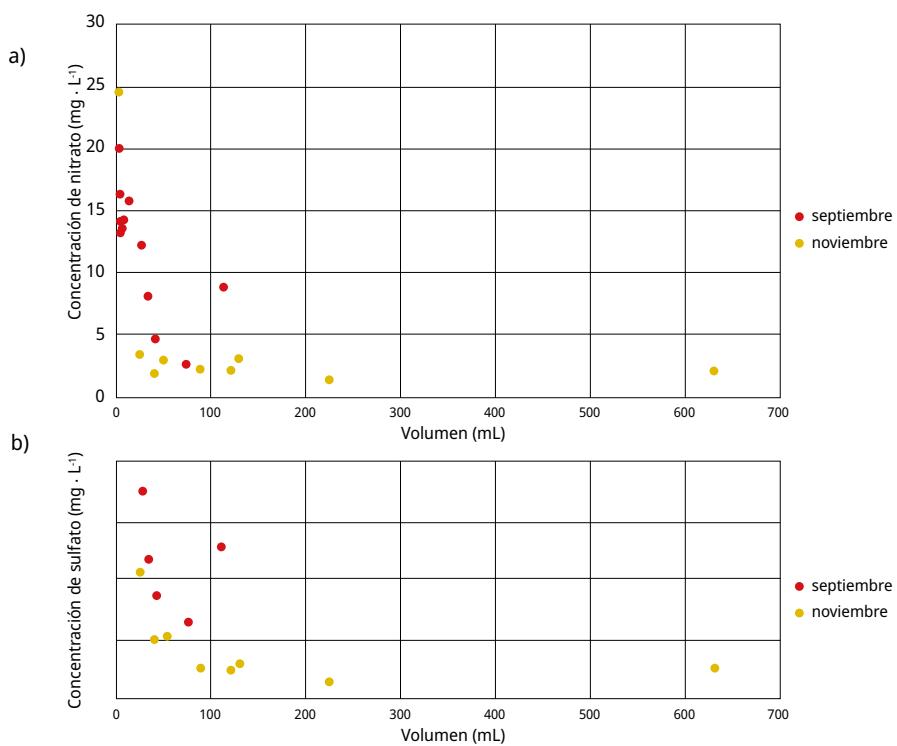
ANEXOS



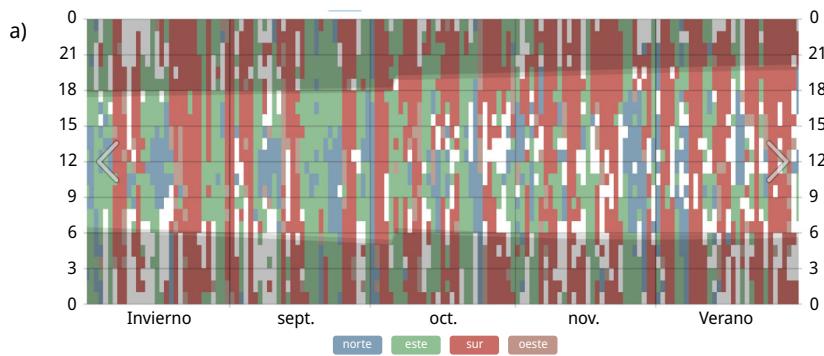
ANEXO 1. Disposición de frascos de PVC para la colecta de muestra de agua de lluvia. En todos los casos se aseguró de que queden en lugares descampados y evitar el vuelco por fuertes vientos.



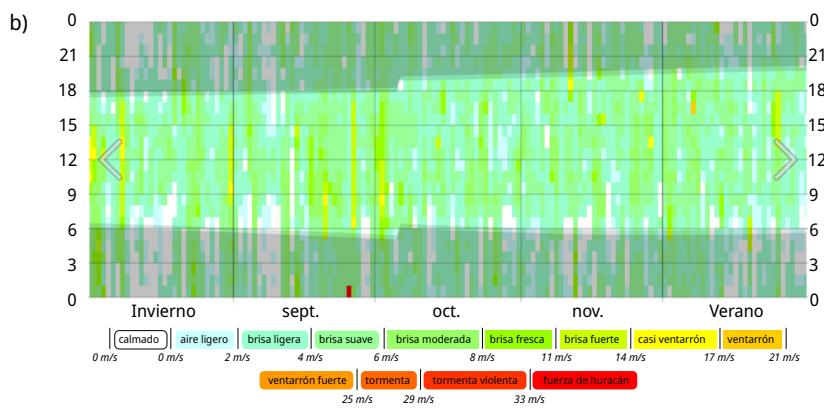
ANEXO 2. Quema de campos de cultivo en la Región Oriental del Paraguay
(Fuente: Elaboración propia).



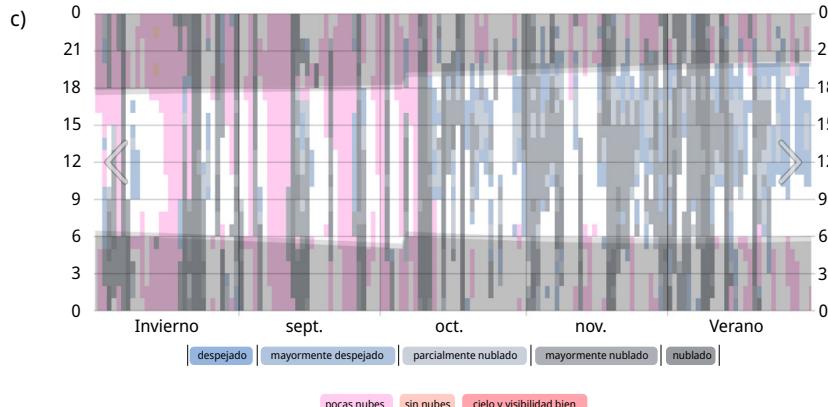
ANEXO 3. Relación entre el volumen de agua recogido con las concentraciones de iones en ambas campañas de muestreo: a) nitrato; b) sulfato.



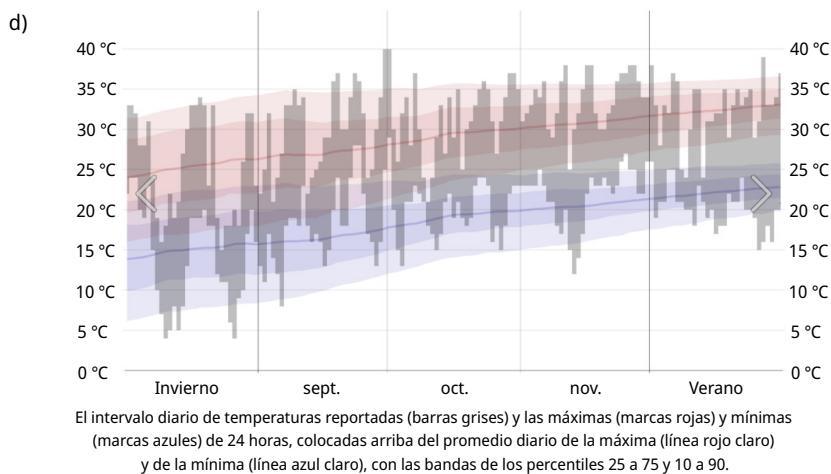
La dirección del viento reportada por hora, codificada por color por punto en el compás.
Las áreas sombreadas superpuestas indican la noche y el crepúsculo civil.



La velocidad del viento reportada por hora, codificada por color en bandas, de conformidad con la escala de Beaufort. Las áreas sombreadas superpuestas indican la noche y el crepúsculo civil.



La cobertura de nubes reportada por hora, categorizada según el porcentaje del cielo cubierto de nubes.



ANEXO 4. Registros de variables meteorológicas durante los meses de septiembre y noviembre del 2024 en Asunción, Paraguay. a) Dirección horaria del viento; b) Velocidad horaria del viento; c) Cobertura horaria de nubes; d) Temperatura diaria (Fuente: © WeatherSpark.com).

ANEXO 5. Relación entre el volumen (mL) de agua recogido durante las campañas de muestreo y las precipitaciones (mm) para cada punto de muestreo.

Punto	Ciudad	Septiembre		Noviembre	
		Volumen (mL)	Precipitación (mm)	Volumen (mL)	Precipitación (mm)
P1	Asunción	7	0,89	0,2	0,03
P2	Luque	*	*	123	15,66
P3	Fernando de la Mora	28	3,57	*	*
P4	Lambaré	41	5,22	*	*
P5	Asunción	113	14,39	630	80,21
P6	Mariano Roque Alonso	*	*	90	11,46
P7	San Lorenzo	7	0,89	1,5	0,19
P8	Capiatá	2,5	0,32	23,5	2,99
P9	Ñemby	34	4,33	*	*
P10	Luque	*	*	51	6,49
P11	San Antonio	75	9,55	*	*
P12	San Lorenzo	14	1,78	*	*
P13	San Lorenzo	3	0,38	224	28,52
P14	Capiatá	5,5	0,70	42	5,35
P15	Asunción	4,6	0,59	130	16,55
Promedio		27,9 ± 34,4	3,55 ± 4,38	131,5 ± 188,3	16,74 ± 23,98

Para el cálculo de las precipitaciones (mm) se ha calculado el área ($\pi \cdot r^2$) de la abertura del envase de PVC para un diámetro de 10 cm y se ha considerado que 1 mm = 1 L/m².

* No se registraron precipitaciones

