

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 EgurenUniversidad 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 MéndezUniversidad 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 VolpeGerente de Análisis, Ensayo y Metrología, Laboratorio
Tecnológico del Uruguay (LATU), Uruguay**EDICIÓN****Carla Rizzotto**Edición técnica revista INNOTEC, 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 INNOTEC

INNOTEC 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. INNOTEC está dirigida a académicos, investigadores y técnicos de la comunidad científica uruguaya e internacional.

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



La revista INNOTEC es miembro de:

Asociación Uruguaya de Revistas Académicas AURA



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

INNOTEC - NÚMERO 28

Julio-diciembre de 2024

ISSN electrónico: 1688-6593

Título clave: INNOTEC (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

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

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

SUMARIO

Artículos

- e670 Cianobacterias tóxicas en costas de San José, Río de la Plata, Uruguay**
Toxic cyanobacteria on the coast of San José, Río de la Plata, Uruguay
Sylvia Bonilla, Signe Haakonsson, María del Carmen Pérez, Fernanda Maciel, Francisco Pedocchi, Rafael Arocena
- e665 Análisis cuantitativo del porcentaje de vesículas de gas en células de *Microcystis* del Embalse San Roque (Córdoba, Argentina) tratadas con ultrasonido**
Quantitative analysis of the percentage of gas vesicles in *Microcystis* cells from the San Roque Reservoir (Córdoba, Argentina) treated with ultrasound
Florescia Elizabeth Romero, Araceli Ferreyra, Micaela Juaneda Allende, Mauro Gómez, Carlos Alberto Vitulich, Pedro Ruiz Díaz, Gastón Ojeda, Guido Marconi, María Valeria Amé, Camila Mussi, Victoria Baraibar, Pedro Mansur, Agostina Rigatuso, Joaquín Fierro, Román Martino, Lucía Boccardi, Silvana Raquel Halac, Diana Míguez, Andrés Rodríguez
- e655 Proliferación de plantas sumergidas en la Laguna Garzón: causas, consecuencias y recomendaciones de manejo**
Proliferation of submerged plants in Laguna Garzón: causes, consequences and management
Lorena Rodríguez-Gallego, Carolina Lescano, Soledad Pasquariello, Elena Rodó, Andrea Cardoso, Sebastián Serra, Ana Martínez, Soledad Costa, Mariana Nin, Andrés Fernández
- e668 Formulación de croquetas congeladas: hacia un producto más saludable**
Formulation of frozen croquettes: towards a healthier product
Patricia Arcia, Florencia García, Lara Pereira, Milagros Torrendell, Ana Curutchet
- e657 Efecto de concentraciones de etanol en las características fisicoquímicas, microbiológicas y sensoriales de un extracto obtenido de *Vainilla planifolia***
Effect of ethanol concentrations on the physicochemical, microbiological and sensory characteristics of an extract obtained from *Vanilla planifolia*
Carlos Julio Tubay Bermúdez, José Cedeño Velasco, Karol Brigitte Moreira Jiménez, Luisa Ana Zambrano Mendoza, George García Mera, Karol Yannela Revilla-Escobar
- e664 Potencial de energía geotérmica de muy baja temperatura de Uruguay para colectores verticales cerrados**
Potential of very low enthalpy geothermal energy of Uruguay for closed vertical collectors
Martín Dos Santos Lafuente, Cintia Alcoba Rodríguez, Ethel Morales, Carlos Bello Cáceres
- e675 Análisis de la variabilidad del error de masa convencional en la calibración de pesas de 5 kg, 10 kg y 20 kg con arreglos de 1 kg**
Analysis of the variability of conventional mass error in the calibration of 5 kg, 10 kg and 20 kg weights with 1 kg arrays
Katherine Quezada, Dimas Gracia, Abdiel López, José Díaz, Aníbal Candelaria, Edwin Aizpurua

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 INNOTEC a ingresar a nuestra página en la plataforma Open Journal Systems (<https://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 INNOTEC

La revista INNOTEC adhiere a los principios publicados por COPE (Committee on Publication Ethics) 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 INNOTEC

Ámbito de los artículos y proceso de revisión

INNOTEC 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.

INNOTEC 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: <https://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 INNOTEC 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.

Cianobacterias tóxicas en costas de San José, Río de la Plata, Uruguay

Toxic cyanobacteria on the coast of San José, Río de la Plata, Uruguay

Cianobactérias tóxicas na costa de San José, Río de la Plata, Uruguai

- 👤 SYLVIA BONILLA (1,2)
- 👤 SIGNE HAAKONSSON (1,2)
- 👤 MARÍA DEL CARMEN PÉREZ* (1,2)
- 👤 FERNANDA MACIEL (3)
- 👤 FRANCISCO PEDOCCHI (3)
- 👤 RAFAEL AROCENA (1)

(1) Sección Limnología, IECA, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

(2) Grupo de Ecología y Fisiología de Fitoplancton.

(3) Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

* en memoria

RECIBIDO: 24/10/2024 → APROBADO: 6/12/2014 ✉ sbon@fcien.edu.uy

RESUMEN

En la costa norte del estuario Río de la Plata se han registrado densas floraciones de cianobacterias potencialmente tóxicas que afectan la calidad del agua para su uso recreativo o potabilización. En este estudio presentamos resultados de 7 años de monitoreo en una zona costera (Punta del Tigre, San José, Uruguay), en los que se determinó temperatura, conductividad, biomasa y composición de cianobacterias. El principal objetivo fue caracterizar las condiciones de temperatura y salinidad que se asocian a la dominancia de las cianobacterias en el fitoplancton de la zona estudiada. Se cuantificó la concentración de microcistinas totales en algunas muestras seleccionadas. Las floraciones se analizaron también en imágenes satelitales a partir de la detección de umbrales de clorofila *a*. Las especies más frecuentes fueron potencialmente tóxicas: *Microcystis aeruginosa*, *M. protocystis*, *M. novacekii*, *Dolichospermum circinale* y *D. uruguayense*, abarcando frecuentemente grandes áreas en concordancia con el análisis satelital. Las concentraciones de microcistinas totales en general superaron las alertas de peligrosidad de la Organización Mundial de la Salud para agua a potabilizar. Temperaturas

del agua superiores a 19 °C, conductividades inferiores a 2 mS/cm y salinidad menor a 0,5 se asociaron con una mayor dominancia de cianobacterias en la biomasa total de fitoplancton. La alta frecuencia de ocurrencia de estos organismos en condiciones de baja conductividad, usuales en la zona, puede comprometer la calidad del agua para diversos usos, incluyendo el consumo humano.

Palabras clave: microcistina, potabilización, calidad de agua, estuario, floraciones.

ABSTRACT

Dense blooms of potentially toxic cyanobacteria have been recorded on the north coast of the Río de la Plata estuary, which affect water quality for recreational or drinking water purposes. In this study we present results of a 7-years monitoring program in a coastal zone (Punta del Tigre, San José, Uruguay), with data of water temperature, conductivity, biomass and composition of cyanobacteria. The main objective was to determine the water temperature and salinity conditions associated with the dominance of cyanobacteria in the phytoplankton of the area studied. The concentration of total microcystins was quantified in selected samples. The blooms were also analyzed in satellite images based on the detection of chlorophyll *a* threshold. The most frequent species were potentially toxic: *Microcystis aeruginosa*, *M. protocystis*, *M. novacekii*, *Dolichospermum circinale* and *D. uruguayense*, often covering large areas in line with the satellite analysis. The concentrations of total microcystins generally exceeded the World Health Organization's danger alerts for drinking water. Water temperatures above 19 °C, conductivities below 2 mS/cm and salinity below 0.5 were associated with a higher dominance of cyanobacteria in the total phytoplankton biomass. The high frequency of occurrence of these organisms in low conductivity conditions, common in the area, may compromise water quality for various uses, including human consumption.

Keywords: microcystin, drinking water, water quality, estuary, blooms.

RESUMO

Na margem norte do Río de la Plata foram registradas densas florações de cianobactérias potencialmente tóxicas, que afetam a qualidade da água para uso recreativo ou para abastecimento de água potável. Neste estudo apresentamos os resultados de 7 anos de monitoramento em uma região costeira (Punta del Tigre, San José, Uruguai), determinando a temperatura, a condutividade, a biomassa e a composição de cianobactérias. O objetivo principal foi caracterizar as condições de temperatura e salinidade que estão associadas à dominância de cianobactérias no fitoplâncton da área estudada. A concentração total de microcistina foi quantificada em amostras selecionadas. Os blooms foram também analisados por imagens de satélite com base na detecção de valores limite de clorofila *a*. As espécies mais frequentes, e que são potencialmente tóxicas, foram *Microcystis aeruginosa*, *M. protocystis*, *M. novacekii*, *Dolichospermum circinale* e *D. uruguayense*, cobrindo frequentemente grandes áreas, de acordo com a análise por imagens de satélite. As concentrações de microcistinas totais excederam geralmente os

alertas de peligro da Organização Mundial de Saúde para a água potável. Temperaturas da água superiores a 19 °C, condutividades inferiores a 2 mS/cm e salinidade inferior a 0,5 foram associadas a um maior predomínio de cianobactérias na biomassa total de fitoplâncton. A elevada frequência de ocorrência destes organismos em condições de baixa condutividade, comuns na região, pode comprometer a qualidade da água para diversos usos, incluindo o consumo humano.

Palavras-chave: microcistina, purificação, qualidade da água, estuário, florações.

INTRODUCCIÓN

La eutrofización afecta los cuerpos de agua de las principales cuencas de Uruguay desde hace dos décadas, con tendencia a intensificarse (Alcántara et al., 2022; Arocena et al., 2018; Conde et al., 2002). Este fenómeno responde a la contaminación del agua, principalmente por fósforo y nitrógeno, como consecuencia de diversas actividades antrópicas dentro de las que se destaca la agricultura (Aubriot et al., 2017; Goyenola et al., 2021). Una de las principales consecuencias de la eutrofización es la aparición de floraciones de cianobacterias potencialmente tóxicas en ríos, lagos y embalses (Bonilla et al., 2015, 2021; Bonilla y Pick 2017). El aumento de la frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos de lluvias y sequías, como consecuencia del cambio climático, tiene un impacto en los ecosistemas eutróficos, favoreciendo un aumento en la frecuencia de las floraciones y cambios en su composición hacia la dominancia de especies filamentosas fijadoras de nitrógeno (Ferrari et al., 2011; Moss et al., 2011; Haakonsson et al., 2017; Burford et al., 2020).

Las cianobacterias pueden producir diversas toxinas, siendo las microcistinas las más comúnmente reportadas en ambientes límnicos de América del Sur y el mundo (Svirčev et al., 2019; Aguilera et al., 2023). Las microcistinas son heptapéptidos cíclicos con efectos hepatotóxicos en casos de exposiciones agudas, como alteraciones de los tejidos hepáticos, necrosis celular y hemorragia intrahepática (van Apeldoorn et al., 2007). La exposición crónica a esta toxina, por otro lado, puede promover tumores (Chorus y Welker, 2021) o afectar otros órganos como los riñones en diversos animales (Fischer y Dietrich, 2000; Yi et al., 2019). Las microcistinas tienen la capacidad de permanecer largo tiempo libre en el agua (Brena y Bonilla, 2009), por lo que su peligrosidad puede prolongarse aun cuando hayan desaparecido las floraciones.

Se han reportado densas floraciones de cianobacterias en las costas uruguayas del Río de la Plata (costa norte), desde Colonia hasta Montevideo (De León y Yunes 2001; O'Farrell et al., 2019; Ferrari, 2020; Bonilla et al., 2021), que se originan a cientos de kilómetros de distancia en los embalses de los ríos Uruguay y Río Negro (Kruk et al., 2019; Aubriot et al., 2020). Dichas floraciones responden a la eutrofización en sinergia con condiciones de la estratificación térmica y bajo caudal, que favorecen la acumulación de altas biomásas de cianobacterias acumulativas (Chalar et al., 2002; Bordet et al., 2017; González-Piana et al., 2017). Las floraciones en el Río de la Plata se asocian fuertemente a las descargas de dichos ríos que aportan agua dulce, siendo la baja salinidad un indicador indirecto de condiciones favorables para el crecimiento de estos organismos en las zonas costeras (Aubriot et al., 2020; Haakonsson et al., 2020; 2024).

Las floraciones más frecuentes son de tipo acumulativas en la superficie del agua dominadas por grandes colonias del complejo *Microcystis aeruginosa* (Haakonsson et al., 2017; Kruk et al., 2019), potencialmente productoras de microcistinas. La mayor información disponible sobre las microcistinas en zonas costeras corresponde a los departamentos de Colonia y Montevideo (De León y Yunes, 2001; Pérez et al., 2013; Kruk et al., 2019; Aubriot et al., 2020), incluyendo un caso de intoxicación humana grave en una playa de Montevideo (Vidal et al., 2017). Se han reportado también poblaciones del género *Dolichospermum*, potencialmente productoras de neurotoxinas, aunque en menor biomasa, acompañando a las floraciones de las especies coloniales (Haakonsson et al., 2017; O'Farrell et al., 2019).

Los desafíos que enfrenta el país con respecto a la conservación de recursos de agua para potabilización y búsqueda de nuevas fuentes, en el contexto de la incertidumbre climática y el deterioro general de los recursos hídricos (Konapala et al., 2020; Goyenola et al., 2021), vuelven necesario aumentar la información sobre cianobacterias en las costas del Río de la Plata.

El objetivo de este trabajo fue caracterizar las condiciones de temperatura y salinidad que se asocian a la dominancia de las cianobacterias en el fitoplancton en la zona costera de Punta del Tigre (Río de la Plata). Complementariamente, se analizaron microcistinas totales en algunas muestras, asociadas a altos (acumulaciones o espuma) y bajos biovolúmenes de cianobacterias, para abarcar un rango amplio de variación de biomasa de estos organismos y evaluar la presencia de toxinas. Se presentan resultados de biomasa y composición de las cianobacterias, microcistinas, temperatura y conductividad derivados de un monitoreo de 7 años en la zona de Punta del Tigre, San José, Río de la Plata. Asimismo, se obtuvieron mapas de clorofila *a* superficial a partir de imágenes satelitales que complementan la cobertura espacial del monitoreo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó en la zona costera de Punta del Tigre, en el estuario del Río de la Plata, Uruguay (35°45'56.0"S, 56°33'27.7"W), área próxima a la desembocadura del Río Santa Lucía. Las muestras se colectaron en tres sitios, dos ubicados a 700 m de la costa (1 y 2) y otro en la playa (sitio 3) (Figura 1). Se realizaron muestreos bimestrales (en primavera y verano) y trimestrales (en otoño e invierno), desde noviembre de 2014 a junio de 2021 (n = 144). El área de estudio es poco profunda (<4 m), oligohalina y meso-eutrófica (Brugnoli et al., 2021).

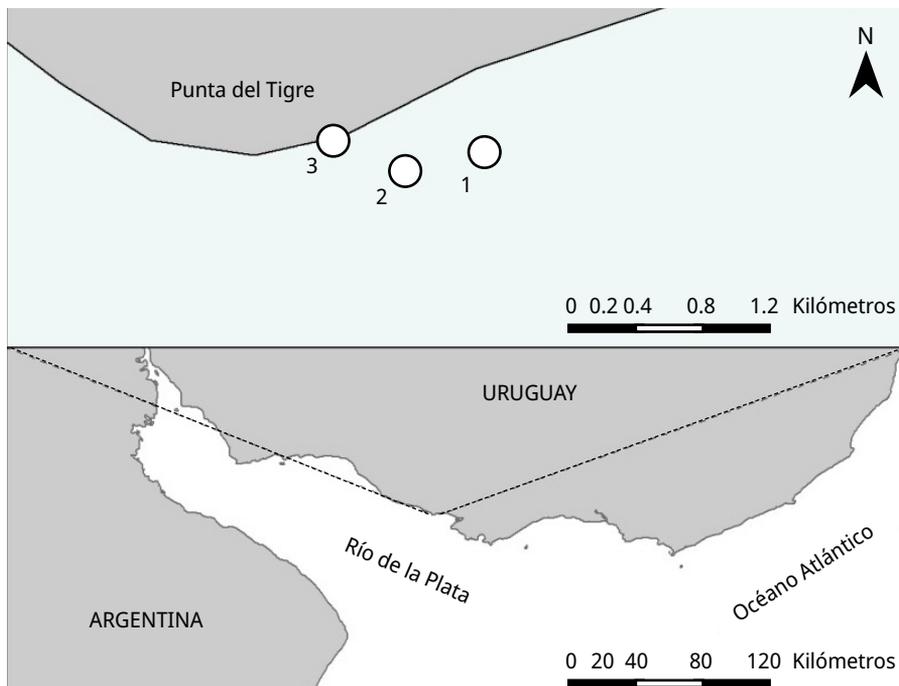


FIGURA 1. Mapa de la zona de estudio (Punta del Tigre) en el Río de la Plata (panel inferior), y detalle donde se indican los tres sitios de muestreo (círculos blancos) (panel superior).

En cada sitio se estimaron medidas *in situ* de temperatura (T), salinidad y conductividad (K). Se tomaron muestras subsuperficiales de agua para el análisis cuantitativo del fitoplancton, de las cuales una parte se fijó con solución de Lugol para su cuantificación en microscopio, y la otra se conservó fresca y en oscuridad para filtrarse en el laboratorio por filtros de fibra de vidrio tipo GFF para el análisis posterior de la clorofila *a*. Los filtros se congelaron a -20 °C, luego se realizó la extracción de los pigmentos lipídicos con etanol caliente al 90 % y se midió la absorbancia por espectrofotometría para calcular la concentración de la clorofila *a* (International Organization for Standardization, 1992).

La cuantificación del fitoplancton se realizó con el método de Utermöhl (Sournia 1978), sedimentando las muestras en cámaras de sedimentación, para enumerar a los organismos en microscopio invertido en campos al azar y calcular la abundancia (Sournia, 1978). El tamaño de los organismos, o volumen (μm^3), se determinó asumiendo formas geométricas simples, para calcular el biovolumen (abundancia x volumen = mm^3/L) como se describe en Bonilla y O'Farrell (2023). También se realizaron arrastres oblicuos con red de plancton de 20 μm de tamaño de poro de modo de obtener muestras cualitativas que se analizaron frescas para la determinación taxonómica, en microscopio Olympus BX 51.

En siete ocasiones, asociadas a la presencia de cianobacterias, se tomaron muestras adicionales para el análisis de toxinas, las que se congelaron de inmediato y enviaron a laboratorio externo para la determinación de microcistinas totales (método ELISA, límite de detección 0,2 $\mu\text{g}/\text{L}$). Se analizaron las relaciones de la temperatura, la salinidad y la conductividad con la proporción de cianobacterias en el total del biovolumen fitoplanctónico, aplicando regresiones locales (Loess por su sigla en inglés), modelos no paramétricos que permiten explorar respuestas potencialmente no lineales (Cleveland &

Devlin, 1988). Todos los análisis y gráficos se realizaron con el programa R 4.3.1 (R Core Team 2021) y los paquetes *ggplot2* y *caret*, entre otros.

Para la estimación satelital de umbrales de clorofila *a* (proxy de biomasa fitoplanctónica) se utilizaron imágenes del sensor MSI (instrumento multiespectral, por su sigla en inglés) a bordo de los satélites Sentinel-2 A y B. Se obtuvieron imágenes de nivel 1C, como se detalla en Maciel et al. (2023a), que fueron corregidas atmosféricamente con el procesador ACOLITE versión 20190326.0 (Vanhellemont, 2019), utilizando el método DSF (ajuste de espectro oscuro, por su sigla en inglés) con la corrección del reflejo solar, para obtener la reflectancia del agua.

Se aplicaron dos índices de clorofila *a* calibrados para la región de estudio: uno de tres bandas que combina el rojo, borde rojo e infrarrojo cercano (Gitelson et al., 2008) y otro índice del tipo forma espectral que utiliza el pico o valle relativo en la banda roja respecto a las bandas verde y borde rojo. Ambos fueron calibrados para la región de estudio (índice 3BI: $R^2 = 0.96$, RMSE, $\mu\text{g/L} = 6.4$ e índice SS (665): $R^2 = 0.96$, RMSE, $\mu\text{g/L} = 7.2$; Maciel et. 2023a) y se obtuvieron mapas de excedencia de distintos umbrales de clorofila *a* según Maciel et al. (2023b). Esta metodología permite disminuir la detección de falsos positivos causados por interferencia óptica de otros componentes del agua, como sedimentos en suspensión o material disuelto coloreado (Maciel et al., 2023a). Además, el análisis de las muestras tomadas *in situ* mediante conteo y estimación del biovolumen de los taxa presentes permitió verificar que las concentraciones de clorofila *a* cercanas a la superficie iguales o mayores a 50 $\mu\text{g/L}$ estaban asociadas a la dominancia de cianobacterias en la zona de estudio, representando más del 90 % del biovolumen fitoplanctónico total (Haakonsson et al., 2024).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El biovolumen de fitoplancton total varió ampliamente a lo largo del estudio, desde valores muy bajos a muy altos asociados a la presencia de floraciones de cianobacterias (mínimo = 0,02 mm^3/L , promedio = 1,25 mm^3/L , máximo = 38,5 mm^3/L). Las cianobacterias se registraron en el 58,4 % de las muestras analizadas a lo largo de todo el período de estudio, y fueron dominantes en la comunidad de fitoplancton (>50 % del biovolumen total) en los períodos más cálidos (cianobacterias dominantes en el 92 % y 67 % de los casos, para verano y otoño, respectivamente).

Las especies de cianobacterias más frecuentes a lo largo de los 7 años fueron las coloniales (orden Chroococcales) *Microcystis aeruginosa* y *M. protocystis*, *M. novacekii* y *M. wesenbergii*, y las filamentosas (orden Nostocales) *Dolichospermum circinale* y *D. uruguayense* (Figura 2, Tabla 1), que pertenecen a los géneros de cianobacterias más frecuentes en formar floraciones en distintos cuerpos de agua eutróficos del país, particularmente en el período estival (Haakonsson et al., 2017).

Se ha demostrado que la presencia de floraciones de cianobacterias en el Río de la Plata puede responder a un efecto del arrastre de biomasa a través de los grandes tributarios que descargan en el estuario (río Negro y río Uruguay) (Chalar, 2009; O'Farrell et al., 2012; Ferrari, 2020; Bonilla et al., 2021). La biomasa de las cianobacterias en el Río de la Plata puede aumentar y acumularse en la costa, por lo que el fenómeno es altamente

dependiente de las precipitaciones en la cuenca y la descarga de los grandes ríos (Kruk et al., 2019; Aubriot et al., 2020; Zabaleta et al., 2023).

Las especies *M. aeruginosa* y *M. protocystis* son productoras de microcistinas y *D. circinale* de neurotoxinas (van Apeldoorn et al., 2007). La especie *Dolichospermum uruguayense* fue descrita recientemente (Kozlíková-Zapomêlová et al., 2016) y aún no hay estudios sobre su toxicidad, aunque es presumible que produzca neurotoxinas (saxitoxinas y análogos o anatoxinas) como otras especies del género (Li et al., 2016). Esto implica que podrían existir concentraciones variables de neurotoxinas en el agua de la zona de estudio asociadas a la presencia de estos taxa. En las siete muestras analizadas para microcistinas se pudo constatar su presencia en todos los casos, variando ampliamente su concentración según la biomasa de cianobacterias y la concentración de clorofila *a* fitoplanctónica registrada (Tabla 1). Todas las muestras analizadas estuvieron dominadas principalmente por especies del género *Microcystis* (Tabla 1).

TABLA 1. Microcistinas totales (MC) determinadas en muestras de la costa de Punta del Tigre, San José. Se indica la fecha, tipo de muestra obtenida, concentración de la clorofila *a* fitoplanctónica (Clo *a*), biovolumen total de cianobacterias (BV ciano), cociente de microcistinas totales por biovolumen (MC/BV), las especies dominantes en la muestra y las condiciones de temperatura (Temp) y conductividad (K) del agua.

Fecha	Floración visible/Sitio	MC μgL^{-1}	Clo <i>a</i> μgL^{-1}	BV ciano mm^3L^{-1}	MC/BV $\mu\text{g}/\text{mm}^3$	Especies dominantes	Temp $^{\circ}\text{C}$	K mS/cm
24/03/2015	Espuma/ Playa	5900 \pm 790 (>OMS)	4700*	224 \pm 12	26,34	<i>M. aeruginosa</i> , <i>M. wesenbergii</i>	23,3	4,11
24/03/2015	Sitio 1	17 \pm 2,6 (>OMS)	12,5	0,10	170	<i>M. novacekii</i> , <i>D. circinale</i> , Chroococcal ni	23	3,02
29/3/2016	Espuma / Sitio 1	17,4 (>OMS)	14,4	0,68	25,58	<i>M. aeruginosa</i> , <i>M. protocystis</i> , <i>D. uruguayense</i>	20,6	0,55
23/3/2017	Espuma/ Sitio 1	27,2 (>OMS)	22,5 Ma: 89	1,54	17,66	<i>M. protocystis</i> , <i>M. novacekii</i> , <i>M. aeruginosa</i>	22	0,25
27/3/2019	No visible/ Sitio 2	13,3 (>OMS)	29,4	2,04	6,392	<i>M. aeruginosa</i> , <i>D. uruguayense</i> , <i>M. protocystis</i>	19,4	0,17
27/3/2019	Espuma/ Sitio 1	72,5 (>OMS)	Ma: 328,7	307,14	0,236	<i>M. protocystis</i> , <i>M. aeruginosa</i> , <i>D. uruguayense</i>	19,4	0,17
29/1/2021	No visible/ Playa	6,2	7,8	0,008	775	<i>M. aeruginosa</i> **	23,3	10

*: dato estimado a partir del biovolumen y clorofila *a* de otras muestras para ese sitio y fecha.
 (>OMS): casos en los que la concentración de microcistinas superó algún nivel de alerta de la OMS (Niveles para microcistinas, basado en la variedad LR: 12 μgL^{-1} , Alerta 1: aguas para potabilización y 24 μgL^{-1} , Alerta 2 para aguas para potabilización y recreacionales, (Chorus y Welker, 2021).
 Ma: mancha (espuma); (**): Alta abundancia de diatomeas: *Chaetoceros* sp., *Coscinodiscus* sp.).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece guías de referencia que indican peligrosidad de exposición a las microcistinas (basadas en la variedad LR), con valores umbrales para aguas recreacionales o para potabilizar (Tabla 1) (Chorus y Welker, 2021). Las muestras de orilla analizadas en este trabajo correspondieron a una alta acumulación de biomasa (“espuma cianobacteriana”), otorgando una evidente coloración al agua (Figura 2, Tabla 1). Se registraron en 3 de 4 casos valores muy elevados de microcistinas, indicando riesgo alto para potabilización y para uso recreacional, superando ampliamente los niveles guía de la OMS (Alerta 2, para aguas a potabilizar y recreacionales: 24 µg/L microcistina-LR; Chorus y Welker, 2021). En las otras fechas donde se analizaron muestras tomadas entre 500 y 1000 m de la costa, se registraron casos que indicaron riesgo moderado para consumo humano, superando el primer nivel de alerta para aguas a potabilizar (OMS, Alerta 1: 12 µg/L microcistina-LR; Chorus y Welker, 2021) (Tabla 1).

Estos resultados indican riesgo potencial de exposición a toxinas para el uso del agua con diferentes fines. El primer registro de *Microcystis aeruginosa* en el Río de la Plata data de 1981 y el primer reporte de una floración tóxica dominada por esta especie es de febrero de 1999 en costas del departamento de Colonia (concentraciones de microcistinas totales: 102 a 1074 µg/g peso seco) (De León y Yunes 2001). En las playas de Montevideo (Río de la Plata) las floraciones de cianobacterias dominadas por *Microcystis* spp. se acumulan en la costa por la acción del viento, formando densas espumas cianobacterianas que pueden contener microcistinas en el orden de miligramos por litro (Gianuzzi et al., 2011; Pérez et al., 2013; Kruk et al., 2019). Esto genera recomendaciones para evitar el contacto con el agua por parte de los bañistas en el marco del programa de monitoreo de la Intendencia de Montevideo (Chorus y Welker, 2021).

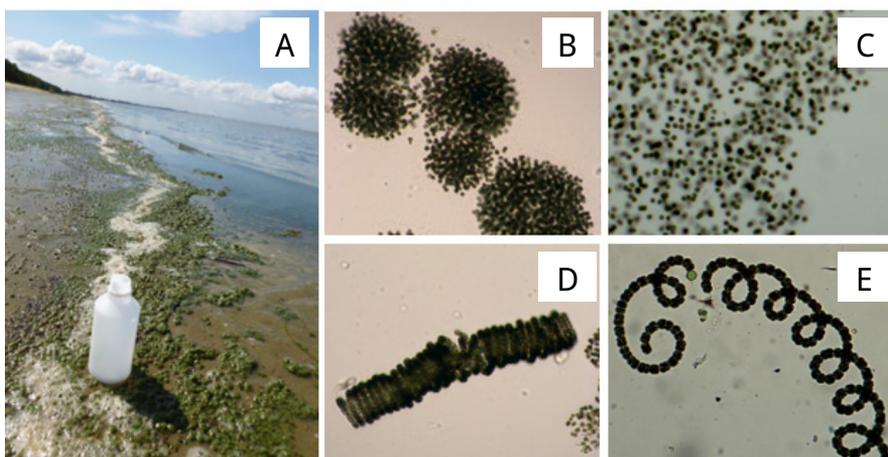


FIGURA 2. A: Playa de Punta del Tigre (24/03/2015) con espuma de cianobacterias cubriendo varios kilómetros. Microfotografías de las especies más frecuentemente encontradas a lo largo del período de estudio, B: colonias de *Microcystis aeruginosa* (x100 aumentos), C: detalle de colonia de *M. protozoicystis* (x200), D: dos filamentos espiralados compactamente de *Dolichospermum uruguayense* (x100) y E: filamento laxamente espiralado de *D. circinale* (x400), se observa heterocito (ángulo superior izquierdo). Fotos: Signe Haakonsson y María del Carmen Pérez.

Los mapas obtenidos a partir de las imágenes satelitales (Figura 3) muestran la extensión espacial que pueden alcanzar las floraciones con concentraciones superiores a $50 \mu\text{g/L}$ de clorofila a , indicando una alta probabilidad de dominancia de cianobacterias (Haakonsson et al., 2024), aunque a valores inferiores también es posible registrar cianobacterias dominando la comunidad fitoplanctónica (Haakonsson et al., 2020; 2024). Entre una y dos semanas antes de los muestreos de marzo de 2016 y enero de 2021 (Tabla 1), ya se observaban zonas con concentraciones de clorofila a mayores a $10 \mu\text{g/L}$ cercanas a la superficie (Figura 3).

Se destaca la complementariedad de los datos satelitales de febrero de 2019 con los obtenidos de muestreos *in situ* en marzo, ya que los primeros permitieron detectar altas concentraciones de clorofila a en fechas anteriores a las visitas de campo (Figura 3). Las floraciones de cianobacterias de verano de 2019, identificadas a través de las imágenes satelitales y de los muestreos *in situ* (Figura 3, Tabla 1) corresponden a uno de los eventos de floraciones masivas más importantes históricamente registrados en las costas del Río de la Plata, ya sea en cuanto a su extensión como a su intensidad (Kruk et al., 2019, Aubriot et al., 2020).

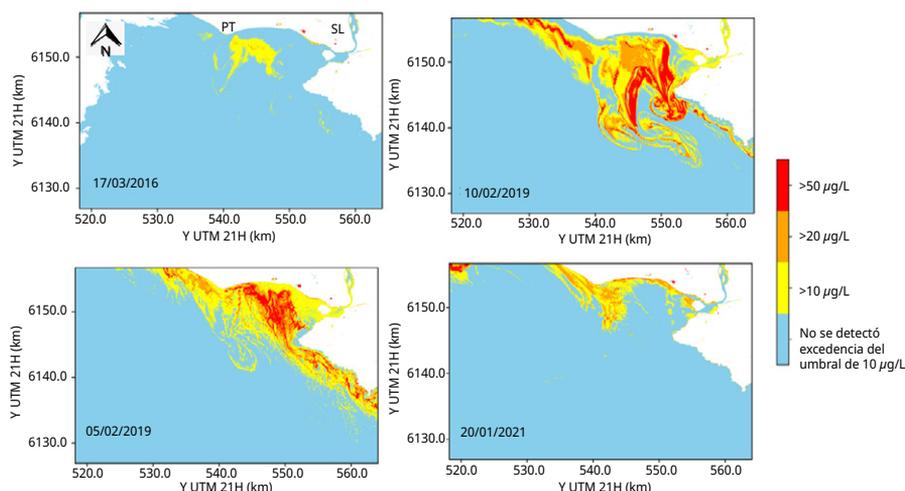


FIGURA 3. Mapas de la zona de estudio mostrando áreas con la distribución de la concentración de clorofila a superficial según cuatro umbrales (barra de colores a la derecha) en distintas fechas, estimada a partir de imágenes satelitales Sentinel 2-MSI y algoritmos calibrados para la región. En cuadro superior izquierdo, PT: Punta del Tigre y SL: río Santa Lucía.

Los análisis de temperatura, conductividad y salinidad en relación con la proporción del biovolumen de cianobacterias en el fitoplancton total permitieron identificar que las condiciones más favorables para la dominancia de las cianobacterias aparecen por encima de $19 \text{ }^\circ\text{C}$ y por debajo de valores de conductividad de 2 mS/cm y $0,5$ de salinidad (Figura 4). Las cianobacterias fueron dominantes en la comunidad de fitoplancton ($>50 \%$ del biovolumen total) en el 30% de los casos, donde la temperatura del agua fue mayor a $19 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que nunca dominaron a temperaturas menores. En condiciones de conductividad

y salinidad bajas, la dominancia de cianobacterias ocurrió en el 29 % y 35 % de los casos (para conductividad <2 mS/cm y salinidad <0,5, respectivamente), mientras que no se registraron casos de dominancia de cianobacterias a salinidades superiores a 0,5.

El modelo bayesiano desarrollado por Haakonsson et al. (2020) para la zona de estudio predice que la probabilidad más alta de encontrar biovolúmenes de cianobacterias mayores a 2 mm³/L ocurre a 22,2 °C y ~ 0,1 mS/cm. Estas condiciones de alta temperatura y bajas conductividad y salinidad, favorables a la dominancia de las cianobacterias, ocurren también hacia el oeste de Punta del Tigre en el periodo estival, donde se planea la construcción de una toma de agua y planta potabilizadora para complementar el abastecimiento de agua potable de la ciudad de Montevideo (Dias Tadeu et al., 2023).

La zona de estudio es altamente variable en términos de salinidad, respondiendo a los patrones de precipitación y la influencia marina, aspectos que afectan a las comunidades biológicas de la zona en general (Muñoz et al., 2024), sumado a los eventos El Niño/La Niña (Castro y Arocena, 2020; Muñoz et al., 2024). Estas condiciones pueden implicar sinergia entre temperaturas y precipitaciones elevadas que generan escenarios propicios para la ocurrencia de floraciones de cianobacterias en la zona. A pesar de que el Río de la Plata es un ecosistema muy amplio y dinámico, la temperatura y la conductividad pueden ser utilizadas como indicadores robustos de medición simple para ser incorporados en planes de monitoreos de zonas costeras, combinando datos medidos *in situ* con sensoramiento remoto (Haakonsson et al., 2024). Los vientos y las mareas son variables secundarias, pero pueden explicar la distribución temporal de las floraciones acumulativas de cianobacterias a escala horaria en las zonas costeras del Río de la Plata (Sathicq et al., 2014; Aubriot et al., 2020), lo que debe ser tenido en cuenta en los planes de monitoreo de la calidad del agua.

Las tendencias previstas para el cono sur de América del Sur (Rodell et al., 2018; Torremorell et al., 2021) incluyen la intensificación de la agricultura y el aumento de la variabilidad climática en las próximas décadas. Estos cambios favorecerán el aumento en magnitud y frecuencia de las floraciones de cianobacterias en los grandes ríos y embalses (O'Farrell et al., 2019; Aguilera et al., 2023). Teniendo en cuenta la influencia de las descargas del río Negro y río Uruguay y su transporte de cianobacterias hasta el Río de la Plata (Kruk et al., 2019, Aubriot et al., 2020), es esperable una tendencia similar en las zonas costeras de los departamentos con mayor influencia límnic (departamentos de Colonia, San José y Montevideo).

Siendo un fenómeno complejo y altamente dinámico, el monitoreo de cianobacterias debe ser flexible en cuanto a la frecuencia de obtención de datos y abarcar la estimación de diversos bioindicadores para lograr la detección temprana y planes de contingencia efectivos (Almuhtaram et al. 2021). Esto hace necesario establecer estrategias de monitoreo que integren niveles complementarios de información (por ejemplo: monitoreo visual y sensoramiento remoto), como se ha propuesto recientemente para el Río de la Plata (Haakonsson et al., 2024), lo que podría optimizar la gestión y ahorrar costos.

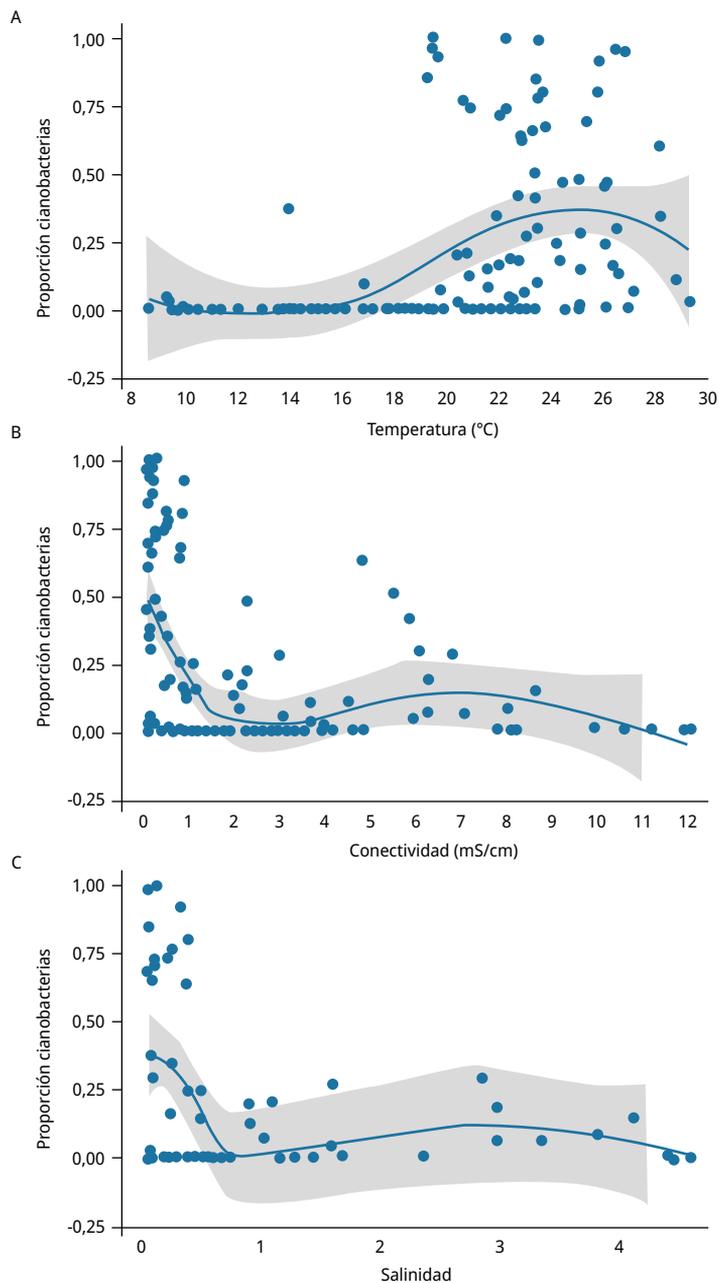


FIGURA 4. Relación entre la temperatura del agua (A), la conductividad (B) y la salinidad (C) con la dominancia de cianobacterias en el biovolumen fitoplanctónico total ajustado con regresión Loess (línea azul), indicando el intervalo de confianza (área gris).

CONCLUSIONES

En el sitio de estudio (Punta del Tigre, San José) se registraron cianobacterias con identificada toxicidad que representan un riesgo elevado de exposición a cianotoxinas

con consecuencias para la salud humana. Las concentraciones de microcistinas totales en agua estuvieron fuertemente relacionadas a la biomasa de cianobacterias. Condiciones estivales de alta temperatura y baja conductividad y salinidad favorecen la aparición de estos organismos en la costa, comprometiendo entonces el uso del agua con fines de potabilización o recreación. Sería necesario realizar estudios de mayor frecuencia contemplando también la detección de neurotoxinas (por ejemplo, anatoxina-a y saxitoxinas) poco estudiadas en el país, reportadas en la literatura en cianobacterias filamentosas del orden Nostocales y que se registran frecuentemente en la zona de estudio. El sensoramiento remoto puede representar un complemento relevante al monitoreo *in situ* para la gestión de la problemática en las zonas costeras del Río de la Plata.

AGRADECIMIENTOS

Dedicamos este trabajo a la memoria de nuestra amiga y colega María del Carmen Pérez (1959-2022), referente nacional en taxonomía de fitoplancton y quien lideró ese aspecto en este estudio. Este trabajo fue parcialmente financiado por el Convenio UTE-Facultad de Ingeniería-Facultad de Ciencias, Universidad de la República. A Elena Galvanese por la revisión del portugués. A Manuel Castro, Nathalie Muñoz y Carmela Carballo por la asistencia en los muestreos.

REFERENCIAS

- Aguilera, A.; Almanza, V.; Haakonsson, S.; Palacio, H.; Benitez Rodas, G.A.; Barros, M.U.G.; Capelo-Neto, J.; Urrutia, R.; Aubriot, L. y Bonilla, S., 2023. Cyanobacterial bloom monitoring and assessment in Latin America. En: *Harmful Algae*, 125, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hal.2023.102429>
- Alcántara, I.; Somma, A.; Chalar, G.; Fabre, A.; Segura, A.; Achkar, M.; Arocena, R.; Aubriot, L.; Baladán, C.; Barrios, M.; Bonilla, S.; Burwood, M.; Calliari, D.L.; Calvo, C.; Capurro, L.; Carballo, C.; Céspedes-Payret, C.; Conde, D.; Corrales, N.; Cremella, B.; Crisci, C.; Cuevas, J.; De Giacomi, S.; De León, L.; Delbene, L.; Díaz, I.; Fleitas, V.; González-Bergonzoni, I.; González-Madina, L.; González-Piana, M.; Goyenola, G.; Gutiérrez, O.; Haakonsson, S.; Iglesias, C.; Kruk, C.; Lacerot, G.; Langone, J.; Lepillanca, F.; Lucas, C.; Martigani, F.; Martínez de la Escalera, G.; Meerhoff, M.; Nogueira, L.; Olano, H.; Pacheco, J.P.; Panario, D.; Piccini, C.; Quintans, F.; Teixeira de Mello, F.; Terradas, L.; Tesitore, G.; Vidal, L. y García-Rodríguez, F., 2022. A reply to "Relevant factors in the eutrophication of the Uruguay River and the Río Negro." En: *Science of the Total Environment*, 818, 151854. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151854>
- Almuhtaram, H.; Kibuye, F. A.; Ajjampur, S.; Glover, C. M.; Hofmann, R.; Gaget, V.; Owen, C.; Wert, E. C. y Zamyadi, A., 2021. State of knowledge on early warning tools for cyanobacteria detection. En: *Ecological Indicators*, 133, 108442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108442>

- Arocena, R.; Chalar, G. y Pacheco, J. P., 2018. Agriculture and elevation are the main factors for Pampasic stream habitat and water quality. En: *Environmental Monitoring and Assessment*, 190. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6622-6>
- Aubriot, L.; Zabaleta, B.; Bordet, F.; Sienna, D.; Risso, J.; Achkar, M. y Somma, A., 2020. Assessing the origin of a massive cyanobacterial bloom in the Río de la Plata (2019): Towards an early warning system. En: *Water Research*, 181, 115944. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115944>
- Aubriot, L. E.; Delbene, L.; Haakonsson, S.; Somma, A.; Hirsch, F. y Bonilla, S., 2017. Evolución de la eutrofización en el Río Santa Lucía: influencia de la intensificación productiva y perspectivas. En: *INNOTEC*, 14, pp. 7–16. DOI: <https://doi.org/10.26461/14.04>
- Bonilla, S.; Haakonsson, S.; Somma, A.; Gravier, A.; Britos, A.; Vidal, L.; De León, L.; Brena, B.; Pérez, M.; Piccini, C.; Martínez de la Escalera, G.; Chalar, G.; González-Piana, M.; Martigani, M. y Aubriot, L., 2015. Cianobacterias y cianotoxinas en ecosistemas límnicos de Uruguay. En: *INNOTEC*, 10, pp. 9–22. DOI: <https://doi.org/10.26461/10.01>
- Bonilla, S. y Pick, F. R., 2017. Freshwater bloom-forming cyanobacteria and anthropogenic change. En: *Limnology and Oceanography e-lectures*, 7, pp. 1–62. DOI: <https://doi.org/10.1002/loe2.10006>
- Bonilla, S.; Aubriot, L.; Haakonsson, S.; Illarze, M.; Díaz, I. y Brena, B. M., 2021. Las floraciones de cianobacterias tóxicas comprometen el uso del agua del Río Negro, Uruguay. En: *INNOTEC*, 22, e577. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.26461/22.08>
- Bonilla, S. y O'Farrell, I. 2023. La importancia del uso del biovolumen en estudios de fitoplancton y monitoreo ambiental de cianobacterias. En: *Ecología Austral*, 33, pp. 558-566. DOI: <https://doi.org/10.25260/EA.23.33.2.0.2148>
- Bordet, F.; Fontanarrosa, M. S., y O'Farrell, I., 2017. Influence of light and mixing regime on bloom-forming phytoplankton in a subtropical reservoir. En: *River Research and Applications*, 33, pp. 1315–1326. DOI: <https://doi.org/10.1002/rra.3189>
- Brena, B. M. y Bonilla, S., 2009. Producción de toxinas y otros metabolitos. En: Bonilla, S., ed. *Cianobacterias planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de monitoreo*. Montevideo: UNESCO, PHI-VII. (Documento técnico, 16). pp. 16-18. ISBN: 978-92-9089-138-3.
- Brugnoli, E.; Arocena, R.; Cabrera-Lamanna, L. y Muniz, P., 2021. Management and monitoring of eutrophication: Trophic state indexes on the Río de la Plata northern coast. En: Leal Filho, W.; Azul, A. M.; Brandli, L.; Lange Salvia, A. y Wall, T., eds. *Life below water. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*. Cham: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-71064-8_114-1
- Burford, M. A.; Carey, C. C.; Hamilton, D. P.; Huisman, J.; Paerl, H. W.; Wood, S. A. y Wulff, A., 2020. Perspective: Advancing the research agenda for improving understanding of cyanobacteria in a future of global change. En: *Harmful Algae*, 91, 101601. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.04.004>
- Castro, M. y Arocena, R., 2020. Exotic bivalves respond differently to sediment supply. En: *Panamerican Journal of Aquatic Sciences*, 15, pp. 163–172.
- Chalar, G.; De León L.; Brugnoli E.; Clemente J. y Paradiso M., 2002. Antecedentes y nuevos aportes al conocimiento de la estructura y dinámica del Embalse Salto Grande. En: Fernandez-Cirelli, A. y Chalar G., eds. *El agua en Iberoamérica: de la Limnología a la*

- Gestión en Sudamérica. CYTED, aprovechamiento y gestión de los recursos hídricos*. Bs. As.: Editorial Eudeba. pp. 123–142.
- Chalar, G., 2009. Embalse Salto Grande: la diversidad del fitoplancton como herramienta para la gestión de las floraciones de *Microcystis*. En: Bonilla, S., ed. *Cianobacterias planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de monitoreo*. Montevideo: UNESCO. PHI-VII. (Documento técnico, 16). pp. 76–78. ISBN: 978-92-9089-138-3.
- Chorus, I. y Welker, M., 2021. *Toxic cyanobacteria in water. A guide to their public health consequences, monitoring and management*. 2a ed. Boca Raton: CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003081449>.
- Conde, D.; Arocena, R. y Rodríguez, L., 2002. Recursos acuáticos superficiales de Uruguay: ambientes, algunas problemáticas y desafíos para la gestión las aguas superficiales continentales. En: *Ambios*, pp. 5–9.
- Cleveland, W. S. y Devlin, S. J., 1988. Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting. En: *Journal of the American Statistical Association*, 83, pp. 596–610. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.1988.10478639>
- De León, L. y Yunes, J. S., 2001. First report of a microcystin-containing bloom of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* in the La Plata river, South America. En: *Environmental Toxicology*, 16, pp. 1989–1990.
- Dias Tadeu, N.; Trimble, M.; Lázaro, M.; Venturini, P. y Venegas, M., 2023. Divergent perspectives about water security: hydrosocial transformations in the metropolitan region of Montevideo (Uruguay). En: *Frontiers in Sustainable Cities*, 5. DOI: <https://doi.org/10.3389/frsc.2023.1207652>.
- Ferrari, G.; Pérez, M. C.; Dabezies, M.; Míguez, D. y Saizar, C., 2011. Planktic Cyanobacteria in the Lower Uruguay River, South America. En: *Fottea*, 11, pp. 225–234. DOI: <http://dx.doi.org/10.5507/fot.2011.021>.
- Ferrari, G., 2020. Water flow and temperature as main factors that regulate phytoplankton and cyanobacterial blooms in a large subtropical river. En: *INNOTECH*, 20, pp. 30–66. DOI: <https://doi.org/10.12461/20.07>.
- Fischer, W. J. y Dietrich, D. R., 2000. Pathological and biochemical characterization of microcystin-induced hepatopancreas and kidney damage in carp (*Cyprinus carpio*). En: *Toxicology and Applied Pharmacology*, 164, pp. 73–81. DOI: <https://doi.org/10.1006/taap.1999.8861>.
- Giannuzzi, L.; Sedan, D.; Echenique, R. y Andrinolo, D., 2011. An acute case of intoxication with cyanobacteria and cyanotoxins in recreational water in Salto Grande dam, Argentina. En: *Marine Drugs*, 9, pp. 2164–2175. DOI: <https://doi.org/10.3390/md9112164>.
- Gitelson, A. A.; Dall’Olmo, G.; Moses, W.; Rundquist, D. C.; Barrow, T.; Fisher, T. R.; Gurlin, D. y Holz, J., 2008. A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. En: *Remote Sensing of Environment*, 112, 3582–3593. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.04.015>
- González-Piana, M.; Fabián, D.; Piccardo, A. y Chalar, G., 2017. Dynamics of total microcystin LR concentration in three subtropical hydroelectric generation reservoirs in Uruguay, South America. En: *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 99, pp. 488–492. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2158-7>

- Goyenola, G.; Kruk, C.; Mazzeo, N.; Nario, A.; Perdomo, C.; Piccini, C. y Meerhoff, M., 2021. Producción, nutrientes, eutrofización y cianobacterias en Uruguay armando el rompecabezas. En: *INNOTEC*, 22, pp. 1–33. DOI: <https://doi.org/10.26461/22.02>
- Haakonsson, S.; Rodríguez-Gallego, L.; Somma, A. y Bonilla, S., 2017. Temperature and precipitation shape the distribution of harmful cyanobacteria in subtropical lotic and lentic ecosystems. En: *Science of the Total Environment*, 609, pp. 1132–1139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.067>
- Haakonsson, S.; Rodríguez, M. A.; Carballo, C.; Pérez, M. del C.; Arocena, R. y Bonilla, S., 2020. Predicting cyanobacterial biovolume from water temperature and conductivity using a Bayesian compound Poisson-Gamma model. En: *Water Research*, 176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115710>
- Haakonsson, S.; Maciel, F.; Rodríguez, M. A.; Ponce de León, L.; Rodríguez-Gallego, L.; Arocena, R.; Pedocchi, F. y Bonilla, S., 2024. Monitoring cyanobacterial blooms: a strategy combining predictive modeling and remote sensing approaches. En: *Environmental Earth Sciences*, 83. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11488-3>
- International Organization for Standardization, 1992. ISO 10260: *Water quality -- Measurement of biochemical parameters -- Spectrometric determination of the chlorophyll-a concentration*. Ginebra: ISO.
- Konapala, G.; Mishra, A. K.; Wada, Y. y Mann, M. E., 2020. Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. En: *Nature Communications*, 11, pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16757-w>
- Kozlíková-Zapomêlová, E.; Ferrari, G. y Pérez, M.C., 2016. *Dolichospermum uruguayense* sp. nov.; a planktic nostocacean cyanobacterium from the Lower Uruguay River, South America. En: *Fottea*, 16, pp. 189–200. DOI: <https://doi.org/10.5507/fot.2016.009>
- Kruk, C.; Martínez, A.; Martínez de la Escalera, G.; Trinchin, R.; Manta, G.; Segura, A. M.; Piccini, C.; Brena, B.; Fabiano, G.; Pirez, M.; Gabito, L.; Alcántara, I. y Yannicelli, B., 2019. Floración excepcional de cianobacterias tóxicas en la costa de Uruguay, verano 2019. En: *INNOTEC*, 18, pp. 36–68. DOI: <https://doi.org/10.26461/18.06>
- Li, X.; Dreher, T. W. y Li, R., 2016. An overview of diversity, occurrence, genetics and toxin production of bloom-forming *Dolichospermum (Anabaena)* species. En: *Harmful Algae*, 54, pp. 54–68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hal.2015.10.015>
- Maciel, F. P.; Haakonsson, S.; Ponce de León, L.; Bonilla, S. y Pedocchi, F., 2023a. Challenges for chlorophyll-a remote sensing in a highly variable turbidity estuary, an implementation with sentinel-2. En: *Geocarto International*, 38(1). DOI: <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2160017>
- Maciel, F. P.; Haakonsson, S.; Ponce de León, L.; Bonilla, S. y Pedocchi, F., 2023b. Satellite monitoring of chlorophyll-a threshold levels during an exceptional cyanobacterial bloom (2018-2019) in the Río de la Plata. En: *Ribagua*, 10, pp. 62–78. DOI: <https://doi.org/10.1080/23863781.2023.2264511>
- Moss, B.; Kosten, S.; Meerhoff, M.; Battarbee, R.W.; Jeppesen, E.; Mazzeo, N.; Havens, K.; Lacerot, G.; Zhengwen, L.; De Meester, L.; Paerl, H. y Scheffer, M., 2011. Allied attack: climate change and eutrophication. En: *Inland Waters*, 1, pp. 101–105. DOI: <https://doi.org/10.5268/iw-1.2.359>

- Muñoz, N.; Bonilla, S.; Arocena, R.; Maciel, F.; Haakonsson, S.; Pedocchi, F. y Machado, I., 2024. Estuarine front dynamics drive ichthyoplankton assemblage in the tidal freshwater zone of the Río de la Plata, South America. En: *Regional Studies in Marine Science*, 73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103521>
- O'Farrell, I.; Bordet, F. y Chaparro, G., 2012. Bloom forming cyanobacterial complexes co-occurring in a subtropical large reservoir: Validation of dominant eco-strategies. En: *Hydrobiologia* 698, pp. 175–190. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1102-4>
- O'Farrell, I.; Motta, C.; Forastier, M.; Polla, W.; Otaño, S.; Meichtry, N.; Devercelli, M. y Lombardo, R., 2019. Ecological meta-analysis of bloom-forming planktonic Cyanobacteria in Argentina. En: *Harmful Algae*, 83, pp. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.01.004>
- Pérez, M.; Gonzalez-Sapienza, G.; Sienna, D.; Ferrari, G.; Last, M.; Last, J.A. y Brena, B.M., 2013. Limited analytical capacity for cyanotoxins in developing countries may hide serious environmental health problems: Simple and affordable methods may be the answer. En: *Journal of Environmental Management*, 114, pp. 63–71. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.052>
- R Core Team, 2021. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. [Consulta: 1 de marzo de 2023]. Disponible en: <https://www.R-project.org/>
- Rodell, M.; Famiglietti, J. S.; Wiese, D. N.; Reager, J. T.; Beaudoin, H. K.; Landerer, F. W. y Lo, M. H., 2018. Emerging trends in global freshwater availability. En: *Nature*, 557, pp. 651–659. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0123-1>
- Sathicq, M. B.; Gómez, N.; Andrinolo, D.; Sedán, D. y Donadelli, J. L., 2014. Temporal distribution of cyanobacteria in the coast of a shallow temperate estuary (Río de la Plata): some implications for its monitoring. En: *Environmental Monitoring and Assessment*, 186, pp. 7115–7125. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3914-3>
- Svirčev, Z.; Lalić, D.; Bojadžija Savić, G.; Tokodi, N.; Drobac Backović, D.; Chen, L.; Meriluoto, J. y Codd, G. A., 2019. Global geographical and historical overview of cyanotoxin distribution and cyanobacterial poisonings. En: *Archives of Toxicology*, 93, pp. 2429–2481. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-019-02524-4>
- Sournia, A., 1978. *Phytoplankton manual*. Paris: UNESCO. (Monographs on Oceanographic Methodology, 6). DOI: <https://doi.org/10.1002/iroh.19800650312>
- Torremorell, A.; Hegoburu, C.; Brandimarte, A. L.; Rodrigues, E. H. C.; Pompêo, M.; da Silva, S. C.; Moschini-Carlos, V.; Caputo, L.; Fierro, P.; Mojica, J. I.; Matta, Á. L. P.; Donato, J. C.; Jiménez-Pardo, P.; Molinero, J.; Ríos-Touma, B.; Goyenola, G.; Iglesias, C.; López-Rodríguez, A.; Meerhoff, M.; Pacheco, J. P.; de Mello, F. T.; Rodríguez-Olarte, D.; Gómez, M. B.; Montoya, J. V.; López-Doval, J. C. y Navarro, E., 2021. Current and future threats for ecological quality management of South American freshwater ecosystems. En: *Inland Waters*, 11, pp. 125–140. DOI: <https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1608115>
- van Apeldoorn, M. E.; Van Egmond, H. P.; Speijers, G. J. A. y Bakker, G. J. I., 2007. Toxins of cyanobacteria. En: *Molecular Nutrition & Food Research*, 51, pp. 7–60. DOI: <https://doi.org/10.1002/mnfr.200600185>
- Vanhellemont, Q., 2019. Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives. En: *Remote Sensing*

- of Environment*, 225, pp. 175–192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.010>.
[Consulta: 2 de abril de 2019]. Disponible en: <https://github.com/acolite/acolite>
- Vidal, F.; Sedan, D.; D'Agostino, D.; Cavalieri, M. L.; Mullen, E.; Parot Varela, M. M.; Flores, C.; Caixach, J. y Andrinolo, D., 2017. Recreational exposure during algal bloom in carrasco beach, uruguay: A liver failure case report. En: *Toxins*, 9, pp. 1–12.
DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins9090267>
- Yi, X.; Xu, S.; Huang, F.; Wen, C.; Zheng, S.; Feng, H.; Guo, J.; Chen, J.; Feng, X. y Yang, F., 2019. Effects of chronic exposure to microcystin-LR on kidney in mice. En: *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16245030>
- Zabaleta, B.; Haakonsson, S.; Achkar, M. y Aubriot, L., 2023. High-frequency zones of phytoplankton blooms in the Río de la Plata Estuary associated with El Niño-Southern Oscillation. En: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 286, 108342.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108342>

Análisis cuantitativo del porcentaje de vesículas de gas en células de *Microcystis* del Embalse San Roque (Córdoba, Argentina) tratadas con ultrasonido

Quantitative analysis of the percentage of gas vesicles in *Microcystis* cells from the San Roque Reservoir (Córdoba, Argentina) treated with ultrasound

Análise quantitativa da porcentagem de vesículas gasosas em células de *Microcystis* do Reservatório San Roque (Córdoba, Argentina) tratadas com ultrassom

- | | |
|---|--|
|  FLORENCIA E. ROMERO (1) |  VICTORIA BARAIBAR (1) |
|  ARACELI FERREYRA (1) |  PEDRO MANSUR (1) |
|  MICAELA JUANEDA ALLENDE (1) |  AGOSTINA RIGATUSO (1) |
|  MAURO GÓMEZ (1) |  JOAQUÍN FIERRO (1) |
|  CARLOS ALBERTO VITULICH (1) |  ROMÁN MARTINO (1) |
|  PEDRO RUIZ DÍAZ (1) |  LUCÍA BOCCARDI (3) |
|  GASTÓN OJEDA (1) |  SILVANA HALAC (4,5) |
|  GUIDO MARCONI (2) |  DIANA MÍGUEZ (3) |
|  MARÍA VALERIA AMÉ (2) |  ANDRÉS RODRÍGUEZ (1,6) |
|  CAMILA MUSSI (1) | |

- (1) Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- (2) Centro de Investigaciones en Bioquímica Clínica e Inmunología – CONICET, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- (3) Latitud – Fundación LATU, Uruguay.
- (4) Instituto Nacional del Agua - Subgerencia Centro de Investigación de la Región Semiárida, Córdoba, Argentina.
- (5) Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra – CONICET, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- (6) Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología – CONICET, Córdoba, Argentina.

RECIBIDO: 24/7/2024 → APROBADO: 28/10/2024 ✉ fe.romero@mi.unc.edu.ar

RESUMEN

El género *Microcystis* (Cyanobacteria) es de gran interés dada su capacidad de formar floraciones en embalses y otros cuerpos de agua. Sus células poseen vesículas de gas que le permiten regular su flotabilidad. Numerosos estudios indican que el ultrasonido, aplicado a ciertas frecuencias y potencias, provoca el colapso de las vesículas de gas, aunque este efecto aún no se ha comprendido completamente. El objetivo de este trabajo fue determinar cuantitativamente el efecto que ejerce esta tecnología en las vesículas de gas y en la abundancia total de *Microcystis spp.* extraídas del Embalse San Roque, en Córdoba, Argentina. Para ello, se expusieron 20 L de muestra a 124 kHz y 20 W de tratamiento ultrasónico (T), y luego se analizó la abundancia celular y el colapso de las vesículas cuantificando su área y determinando su porcentaje relativo de las células sedimentadas por microscopía electrónica de transmisión. No hubo variaciones en la abundancia, y se produjo un 10 % de sedimentación para T, donde el porcentaje de vesículas de las células tuvo una disminución significativa. Los datos numéricos del colapso de vesículas aportan relevancia a este estudio; sin embargo, dado el bajo porcentaje de sedimentación, es importante seguir investigando los efectos del ultrasonido sobre la pérdida de flotabilidad de *Microcystis spp.* y su radio de acción.

Palabras clave: floraciones algales, cianobacterias, flotabilidad, frecuencia de ultrasonido.

ABSTRACT

The genus *Microcystis* (Cyanobacteria) is of great interest due to its ability to form blooms in reservoirs and other bodies of water. Its cells possess gas vesicles that allow it to regulate its buoyancy. Numerous studies indicate that ultrasound, applied at certain frequencies and powers, causes the collapse of gas vesicles, although this effect has not yet been fully understood. The objective of this work was to quantitatively determine the effect that this technology exerts on gas vesicles and on the total abundance of *Microcystis spp.* extracted from the San Roque Reservoir, Argentina. To this end, 20 L of sample were exposed to 124 kHz and 20 W of ultrasonic treatment (T), and then cellular abundance and vesicle collapse were analyzed by quantifying their area and determining their relative percentage of the cells that settled using transmission electron microscopy. There were no variations in abundance, and a 10 % sedimentation occurred for T, where the percentage of vesicles in the cells showed a significant decrease. The numerical data on vesicle collapse adds relevance to this study; however, given the low percentage of sedimentation, it is important to continue investigating the effects of ultrasound on the loss of buoyancy in *Microcystis spp.* and its range of action.

Keywords: algal blooms, cyanobacteria, buoyancy, ultrasound frequency.

RESUMO

O gênero *Microcystis* (Cyanobacteria) é de grande interesse devido à sua capacidade de formar florações em reservatórios e outros corpos d'água. Suas células possuem vesículas gasosas que permitem regular sua flutuabilidade. Vários estudos indicam que o ultrassom, aplicado a certas frequências e potências, provoca o colapso das vesículas gasosas, embora esse efeito ainda não tenha sido completamente compreendido. O objetivo deste trabalho foi determinar quantitativamente o efeito que essa tecnologia exerce nas vesículas gasosas e na abundância total de *Microcystis spp.* extraídas do Reservatório San Roque, Argentina. Para isso, foram expostos 20 L de amostra a 124 kHz e 20 W de tratamento ultrassônico (T), e então foram analisadas a abundância celular e o colapso das vesículas, quantificando sua área e determinando sua porcentagem relativa das células sedimentadas por meio de microscopia eletrônica de transmissão. Não houve variações na abundância, e ocorreu uma sedimentação de 10 % para T, onde a porcentagem de vesículas nas células teve uma diminuição significativa. Os dados numéricos sobre o colapso das vesículas conferem relevância a este estudo; no entanto, dada a baixa porcentagem de sedimentação, é importante continuar investigando os efeitos do ultrassom sobre a perda de flutuabilidade em *Microcystis spp.* e seu raio de ação.

Palavras-chave: florações de algas, cianobactérias, flutuabilidade, frequência de ultrassom.

INTRODUCCIÓN

Las proliferaciones masivas de cianobacterias son comunes en cuerpos de agua superficiales en todo el mundo, y causan efectos adversos en ecosistemas acuáticos y en la salud pública (Sosa Benegas et al., 2020). Estos eventos son promovidos principalmente por la eutrofización cultural y se proyecta que serán aún más intensos, frecuentes y generalizados debido al efecto del cambio climático, ya que el aumento de la temperatura y la estratificación de la columna de agua favorecen el crecimiento de las poblaciones de cianobacterias (Dick et al., 2021). Los embalses de la provincia de Córdoba experimentan desde hace varias décadas un fuerte y continuo proceso de contaminación de origen antrópico que los ha llevado a un estado de eutrofización avanzado (Rodríguez y Ruiz, 2016; Halac et al., 2020; Bonansea et al., 2021; Mengo et al., 2024).

El Embalse San Roque (ESR) fue construido entre 1888 y 1944, principalmente para abastecimiento de agua, generación de energía eléctrica, riego y control de crecidas. En la actualidad es uno de los ambientes acuáticos continentales más problemáticos del país debido a su avanzado grado de eutrofización (O'Farrell et al., 2019; Daga et al., 2021). Presenta frecuentes anoxias hipolimnéticas, eventos de muerte de peces y dominancia de especies de cianobacterias (entre ellas *Microcystis aeruginosa*) (Rodríguez y Ruiz, 2016; Halac et al., 2019), además de la alteración de propiedades organolépticas del agua y afectación de las actividades recreativas.

No se ha descubierto aún el método más eficiente para el tratamiento contra las floraciones de cianobacterias sin generar grandes gastos económicos ni efectos secundarios ambientales. Ante esto, el ultrasonido se considera como alternativa, pero no está demostrado que sea factible su producción a nivel industrial (Romero et al., 2022). Se

han documentado antecedentes sobre sus efectos negativos en la fotosíntesis, daño de la membrana celular, pérdida de flotabilidad por ruptura de las vesículas de gas (Kong et al., 2019; Peng et al., 2020), pero quedan numerosas preguntas por responder.

Las vesículas de gas son estructuras intracelulares que permiten que las colonias regulen su posición vertical en la columna de agua en función de diferentes condiciones ambientales, como la radiación solar disponible y la concentración de nutrientes. Son estructuras rígidas, inertes, huecas, llenas de gas, que regulan la flotabilidad, pero pueden colapsar cuando se encuentran a una presión hidrostática elevada o cuando existe una diferencia de presiones interna y externa (Romero et al., 2022). Según Huang et al. (2020), al exponer las vesículas de gas a bajas frecuencias de ultrasonido (20-200 kHz), el colapso puede estar dado por un fenómeno denominado cavitación acústica, proceso que puede resumirse como la generación, vibración mecánica y el consiguiente colapso de diminutas burbujas (Huang et al., 2020).

Este estudio tuvo el objetivo de poner a prueba el efecto del ultrasonido con un transductor de elaboración propia (Romero et al., 2022) sobre la abundancia celular y vesículas de gas de *Microcystis spp.*, enfatizando en determinar cuantitativamente el colapso de estas estructuras. Para ello, se realizaron ensayos donde se evaluaron la pérdida de flotabilidad y la abundancia celular, y se calculó el porcentaje de las vesículas de gas de células sedimentadas, mediante microscopía electrónica, en muestras extraídas del ESR sometidas a tratamiento ultrasónico en baja frecuencia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo, aclimatación de muestras naturales y diseño experimental

Las muestras de poblaciones naturales de *Microcystis spp.* fueron extraídas de la costa cercana al "Club de Remo" del ESR (31°24'17.3"S 64°29'26.9"W), durante un evento de floración en marzo de 2023. Inmediatamente luego de la extracción, se comprobó que estas muestras estuvieran conformadas por *Microcystis spp.* en un porcentaje mayor al 90 % y *a posteriori* se mantuvieron en el laboratorio en condiciones naturales de luz y temperatura ambiente (24 ± 1 °C), en recipientes transparentes opacos de 10 L, durante 24 h previas al ensayo.

El ensayo consistió en colocar 20 L de muestra en dos recipientes de vidrio prismáticos de 60 L de capacidad (35 x 35 x 50 cm), cada uno con un transductor en el fondo en posición vertical y en el centro (Figura 1). Estos transductores fueron obtenidos de la empresa Ginpertec, con dimensiones de 59.5 mm de diámetro y 98 mm de altura, y fueron alimentados con un amplificador desarrollado en el laboratorio (Romero et al., 2022) (Figura 2). El control (C) mantuvo el transductor apagado a lo largo del ensayo y el tratamiento (T) correspondió al recipiente con el transductor a una frecuencia de 124 kHz y potencia de 20 W. El tiempo de exposición, el volumen y la frecuencia establecidos fueron determinados en ensayos previos, evaluando el mismo volumen de muestras a diferentes frecuencias, registrando el tiempo aproximado al cual las células sedimentan completa e irreversiblemente. En base a esto, el tiempo de exposición definido fue de 24 h, manteniendo las condiciones naturales de luz (ambiente ampliamente iluminado sin

irradiación solar directa) y temperatura constante a 24 ± 1 °C mediante control por aire acondicionado y utilizando un sistema de sensado y *data logger* de temperatura (sensores DS18B20 fabricados por Dallas Semiconductors y una raspberry-pi). Los parámetros de frecuencia y potencia del transductor fueron registrados a lo largo del experimento en el software Hércules v.3.2.8 (HW Group, 2014).

Para el análisis de Microscopía Electrónica de Transmisión (MET), se extrajeron muestras de 15 ml de cada recipiente en el tiempo inicial previo al encendido del transductor (Ci y Ti), y al final del ensayo (Cf y Tf). Las muestras de Ci, Ti y Cf se extrajeron homogeneizando el contenido del recipiente, mientras que las de Tf se extrajeron, sin homogeneizar, del fondo del recipiente (es decir, de las colonias que hubieran sedimentado). Se realizó de esta manera ya que el objetivo principal fue determinar el porcentaje de vesículas colapsadas por tratamiento ultrasónico, por lo que se enfatizó en extraer muestras de las células que perdieran flotabilidad, exclusivamente. Para la determinación de la abundancia celular se extrajeron 200 ml de homogeneizado tanto para Ci y Ti como para Cf y Tf. Luego de la homogeneización para la extracción de las muestras iniciales, se permitió que las colonias migraran a la superficie para posteriormente dar comienzo al ensayo.

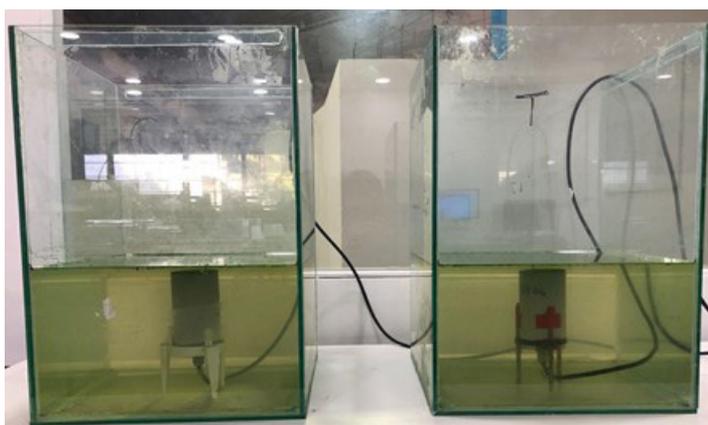


FIGURA 1. Recipientes C (izquierda) y T (derecha) con las muestras de *Microcystis spp.* suspendidas en superficie y transductores en soportes orientados hacia ellas.



FIGURA 2. Dispositivo de ultrasonido utilizado, con su transductor (derecha) y amplificador conectado, con frecuencia y potencia medidas en osciloscopio y registradas en software (izquierda).

Obtención de micrografías electrónicas y procesamiento de imágenes

Las muestras de 15 ml obtenidas al inicio y al final del ensayo fueron llevadas, inmediatamente después de su extracción, al Centro de Microscopía Electrónica de la Universidad Nacional de Córdoba para realizar el tratamiento correspondiente y obtener micrografías de las células de *Microcystis spp.* Allí, las muestras se lavaron con PBS (tampón fosfato salino) y se fijaron en una mezcla de Karnovsky que contenía formaldehído al 4 % (p/v) y glutaraldehído al 2 % (p/v) en tampón de cacodilato 0,1 M, durante 2 h. Luego, las células fijadas se centrifugaron y el material sedimentado se lavó y trató con OsO₄ al 1 % durante 1 h, antes de ser teñido 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 con una serie de cetonas frías graduadas, las células se incluyeron en resina Spurr y, a partir de una polimerización de 48 hs a 60 °C, se cortaron secciones ultrafinas de 0,1 µm usando un ultramicrotomo JEOL con un cuchillo de diamante. Finalmente, las rejillas se tiñeron con acetato de uranilo/citrato de plomo y se examinaron en un MET (Zeiss LEO906, Oberkochen, Alemania) operado a un voltaje de aceleración de 80 kV y fueron fotografiadas con una cámara Megaview G3 (EMSIS GmbH, Münster, Alemania).

A partir de las micrografías obtenidas, se seleccionaron al azar 20 células de cada una, considerando que no estuvieran en proceso de división celular. Para el análisis de las vesículas de gas se utilizó el software ImageJ (ImageJ, 2023). Se seleccionaron y registraron todas las áreas de las vesículas de gas de las células seleccionadas y el área total de cada célula (Figura 3), y luego se calculó el porcentaje relativo del área de las vesículas de gas en cada una de las 20 células por muestra. Además, previo y posterior al ensayo se obtuvieron fotografías en vista superior y de perfil a los recipientes para analizar la flotabilidad. Con las fotografías en vista superior se realizó la determinación del porcentaje de colonias sedimentadas de los recipientes en el tiempo final (Cf y Tf), midiendo el área de las colonias en superficie con ImageJ (ImageJ, 2023). En el software RStudio v6.1.0 (Posit, 2023) se realizaron pruebas de normalidad y de homogeneidad de varianza para verificar el cumplimiento de supuestos estadísticos; posteriormente se realizó un ANOVA con un test *post hoc* de Tukey, con un intervalo de confianza del 95 %, para corroborar diferencias significativas entre los tratamientos C y T.

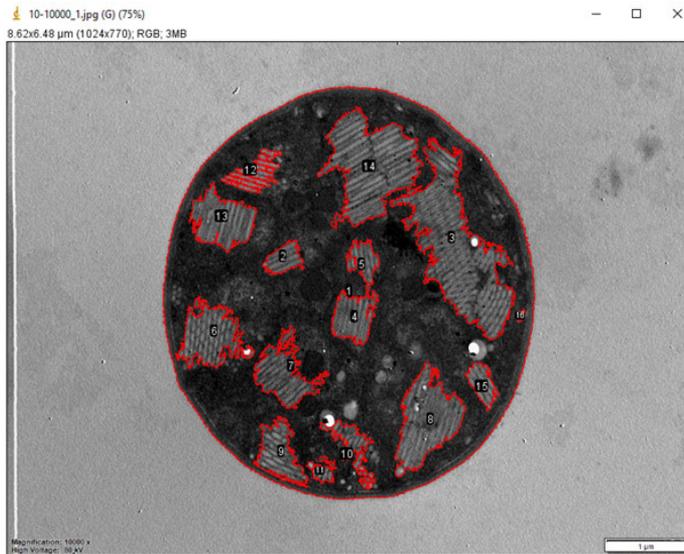


FIGURA 3. Imagen obtenida por MET de una célula del recipiente C de *Microcystis spp.*, representativa del análisis realizado con ImageJ (ImageJ, 2023) del área relativa de vesículas de gas por célula, delimitadas en rojo.

Determinación de la abundancia celular de *Microcystis spp.*

Para la determinación de la abundancia celular (cél.ml⁻¹) de las poblaciones de *Microcystis spp.*, de las muestras de 200 ml obtenidas en tiempo inicial (Ci y Ti) y en tiempo final (Cf y Tf), se realizó un conteo celular en una cámara de Fuchs Rosenthal (marca Marienfeld, Alemania) por microscopía óptica (Leica DM750 con cámara ICC50 W, Alemania). Este consistió en contar unidades de recuento ocupadas por colonias de *Microcystis spp.* (1 unidad de recuento = ¼ de celda de la cámara, correspondiente a un promedio de 584 células) (Ferreyyra et al., 2023; Figura 4), registrándolas junto con el número de campos contados, y repitiendo este procedimiento tres veces por cada muestra. Luego, estos datos fueron aplicados en la fórmula (1) para obtener el número de células por mililitro (American Public Health Association et al., 2017).

$$\frac{\text{Cél}}{\text{ml}} = \frac{N}{A \times D \times F} \times \frac{1000}{K} \text{ mm}^3 \quad (1)$$

Donde:

N: n° de unidades de recuento.

A: área del campo (mm²).

D: profundidad del campo (mm).

F: n° de campos contados.

K: factor de concentración (Volumen de muestra/Volumen concentrado).

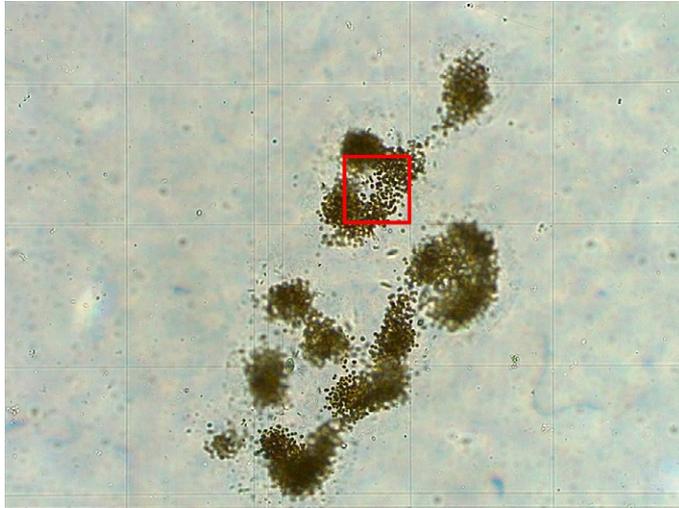


FIGURA 4. Colonia de *Microcystis spp.* visualizada en microscopio óptico (10x) en cámara de Fuchs Rosenthal, representando la unidad de recuento (cuadro rojo), según Ferreyra et al. (2023).

RESULTADOS

Los datos registrados del funcionamiento del transductor, con respecto a potencia y frecuencia, evidenciaron que la frecuencia promedio fue de aproximadamente 122 ± 1 kHz en todo el ensayo, y la potencia configurada en 20 ± 1 W se mantuvo estable.

En las siguientes imágenes se observan los recipientes Cf y Tf, donde se distinguen las colonias sedimentadas (Figura 5) y el porcentaje total de las colonias en superficie y de las que perdieron flotabilidad (Figura 6a y 6b).

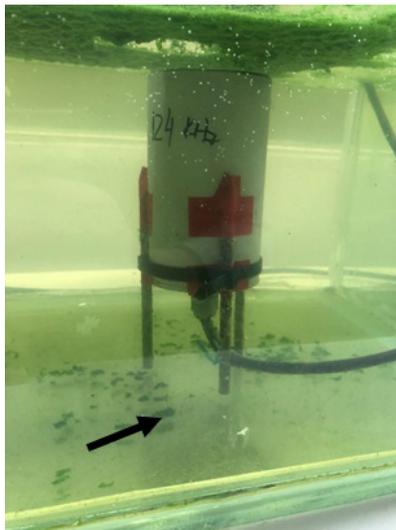


FIGURA 5. Fotografía tomada postratamiento del recipiente T, donde se pueden observar en el fondo las células (en colonias) sedimentadas (flecha).

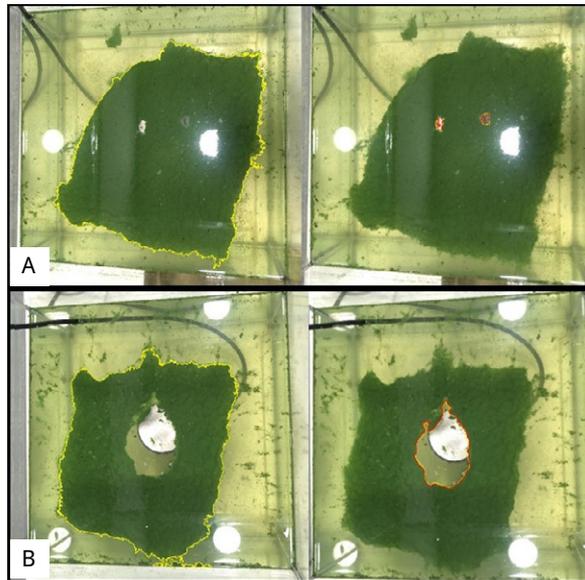


FIGURA 6. Fotografías de la superficie de las muestras de *Microcystis spp.* en ambos recipientes tomadas luego del tratamiento, en donde se observa el área sedimentada del recipiente T, por encima del transductor ultrasónico (a: control; b: tratamiento. Contorno amarillo: área total; contorno rojo: área de sedimentación).

Los resultados obtenidos a partir del procesamiento de estas imágenes mostraron que al final del experimento el control (Cf) presentó un porcentaje de sedimentación de células de 0,38 %, mientras que en el tratamiento (Tf) fue de un 10,11 %.

En cuanto al porcentaje de vesículas de gas, en la figura 7 se puede observar una micrografía representativa de cada muestra (Figura 7), donde la flecha indica las vesículas de cada célula. En la comparación de los dos tratamientos se determinó que en Tf estas estructuras representaron una proporción del área total de la célula menor que al inicio (Ti) y que en el control (Ci y Cf). Además, Tf fue la única muestra que presentó las vesículas de gas en forma desagregada. En la Figura 8 se expresan los porcentajes de área representada por vesículas de gas en cada muestra, siendo del $32 \pm 6 \%$ para Ci, Cf y Ti, y un porcentaje significativamente menor para Tf ($10 \pm 4 \%$) (Figura 8). La disposición desagregada y el porcentaje de las vesículas obtenido en Tf responden concretamente al colapso y la consecuente pérdida de flotabilidad generada por el tratamiento en estas células.

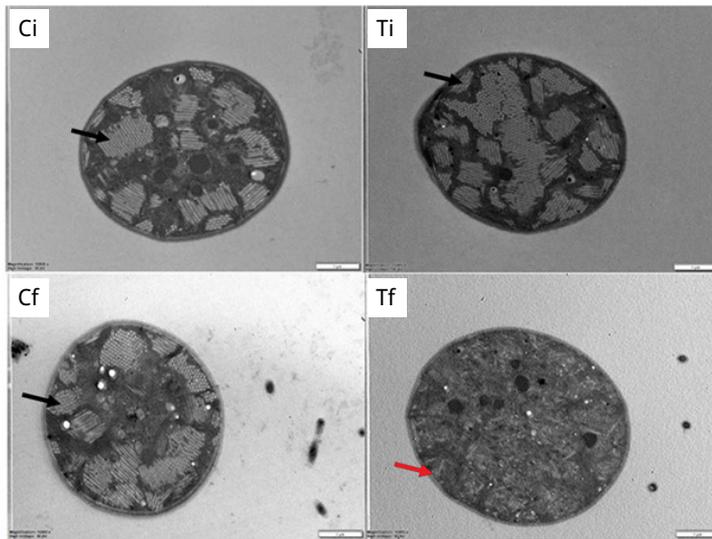


FIGURA 7. Micrografías de células de *Microcystis spp.* obtenidas por MET donde se distinguen las vesículas de gas intactas y las colapsadas. Flecha negra: vesículas de gas sin tratamiento ultrasónico. Flecha roja: vesículas de gas con tratamiento ultrasónico (colapsadas). Ci: control inicial; Ti: tratamiento inicial; Cf: control final; Tf: tratamiento final (células sedimentadas).

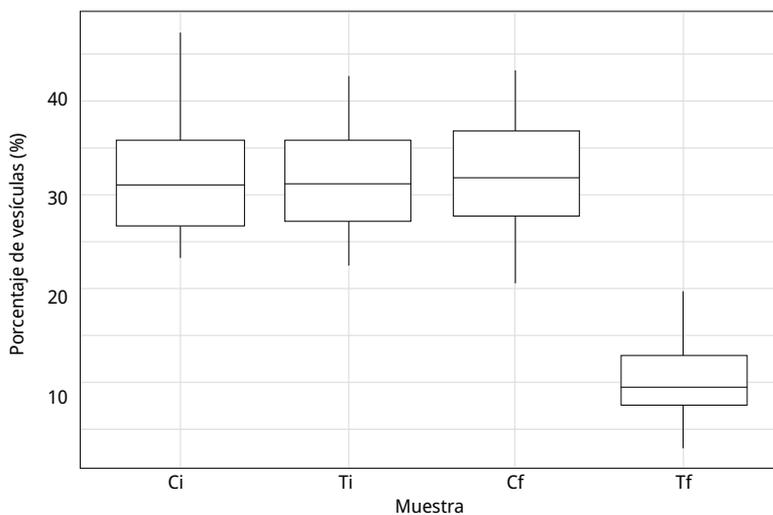


FIGURA 8. Valores promedio y desviación estándar del porcentaje de vesículas de gas (eje y) del área celular por muestra. Ci: control inicial; Ti: tratamiento inicial; Cf: control final; Tf: tratamiento final (células sedimentadas).

La abundancia celular total no arrojó diferencias significativas entre los tratamientos, pero se pudo observar que fue menor en el Ci y Cf en comparación a Ti y Tf (Figura 9), lo cual se atribuye a una diferencia inicial en la abundancia de las muestras del C con el T, dada por la heterogeneidad de las muestras ambientales. Se realizó un segundo análisis de estas muestras, determinando la diferencia de abundancia entre Ci y Cf y entre Ti

y Tf. Los resultados reflejaron una disminución del 40 % de las células del C, mientras que no se observaron diferencias entre Ti y Tf. Cabe destacar que en esta última, como se observa en la figura 9, el valor de desvío estándar es considerablemente alto en comparación a las otras muestras, por lo que resultaría importante realizar nuevamente el análisis con mayor cantidad de réplicas.

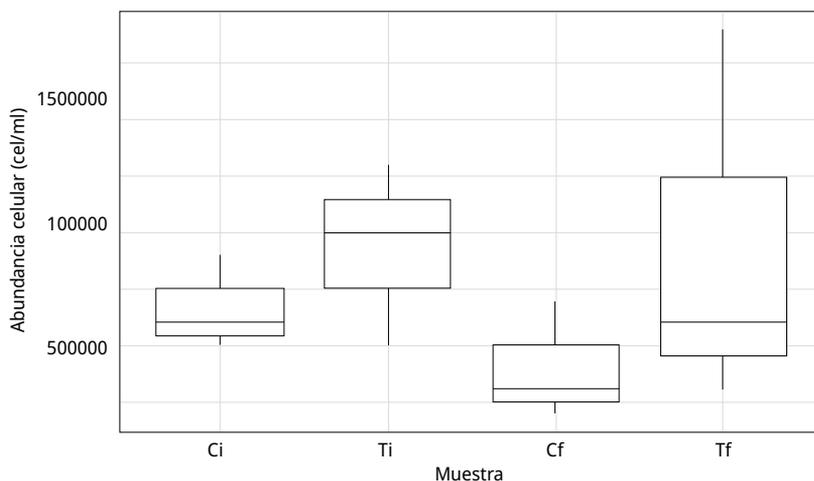


FIGURA 9. Promedio y desvío estándar de los valores de la abundancia celular (eje y) de *Microcystis spp.* obtenidos en las muestras. Ci: control inicial; Ti: tratamiento inicial; Cf: control final; Tf: tratamiento final (homogeneizado).

DISCUSIÓN

En primera instancia, los valores de frecuencia y potencia de los transductores ultrasónicos se mantuvieron en los rangos esperados, por lo que se pudo descartar la influencia de un mal funcionamiento de los equipos en los resultados de *Microcystis spp.*

Los resultados de abundancia celular total no reflejaron efectos bajo tratamiento ultrasónico, ya que se mantuvieron en valores similares entre el tiempo inicial y el tiempo final, tanto para el C como para el T, sin diferencias significativas entre Cf y Tf. En el trabajo de Kieffer et al. (2015), donde utilizaron una frecuencia de 20 kHz y 9 W sobre un volumen de 230 ml durante 60 min, solo persistieron algunas colonias de *M. aeruginosa* que fueron reduciéndose en tamaño y cantidad de células a medida que aumentaba el tiempo de exposición.

Otros autores realizaron análisis a una frecuencia de 120 kHz, 0.045 W/ml (22 W) en cultivos monoespecíficos de 500 ml, y obtuvieron también una reducción de la densidad celular (aunque fue significativamente mayor en frecuencias altas, 1120 kHz) en un lapso de 10 min (Kong et al., 2019). Sin embargo, estos trabajos fueron realizados en volúmenes mucho menores (de 50 a 100 veces menores) y uno de ellos en cultivos monoespecíficos de *M. aeruginosa*. Al respecto, se ha reportado que bajo condiciones naturales las células de *M. aeruginosa* se agregan secretando material intracelular, formando colonias amorfas (Yu et al., 2013), y esta agregación favorece su supervivencia ante predadores (Yang et al., 2008).

Los cultivos en laboratorio tienen mayor número de células aisladas que agrupadas y menor cantidad de material extracelular segregado, lo que favorece su daño y/o destrucción (Kieffer et al., 2015). Lo anterior indica que el tipo de muestra en la que se realice el tratamiento es un factor determinante, por lo que es necesario proyectar experimentos a futuro con cultivos mono-específicos y evaluar la diferencia de resultados con muestras naturales. Por otro lado, haciendo énfasis en el volumen utilizado, otros autores han hecho ensayos en 20 L de bajas frecuencias ultrasónicas (20 a 200 kHz) sin obtener resultados significativos con respecto a la densidad celular (Hobson et al., 2012). También existen revisiones aplicando esta herramienta en volúmenes mucho mayores (estanques de hasta 300000 L), tanto en bajas como en altas frecuencias (20 a 1700 kHz), donde afirman que en volúmenes más grandes se transmite significativamente menos energía y, en consecuencia, el impacto sobre las cianobacterias es mucho menor (Lürling et al., 2016).

A partir de los antecedentes y resultados obtenidos, tal como se mencionó anteriormente, se consideró importante repetir el análisis de abundancia celular utilizando un mayor número de réplicas para reforzar estos datos.

Con respecto a los resultados de las vesículas de gas por MET, se pudo observar una marcada disminución y desagregación intracelular en las células tratadas, a raíz de su colapso. Sin embargo, solo un 10 % de las colonias del total del recipiente perdió flotabilidad. Una revisión realizada por Míguez (2016) afirma que un modelo de dispositivo de la empresa LG Sonic permite tratar superficies de agua con una cobertura de hasta 500 m de diámetro y en dos o tres semanas se trataría un tajamar mediano, pero eso se debe determinar experimentalmente en cada caso. Esto sugiere que la distancia del dispositivo a la superficie y el volumen de muestra deberían estudiarse en profundidad para determinar el rango y mecanismo de acción del dispositivo y poder explicar el bajo porcentaje de células sedimentado.

La ruptura de las vesículas no produce la muerte de las células dado que pueden regenerarse bajo condiciones adecuadas de iluminación. La aplicación de esta metodología sería efectiva en sitios donde la profundidad de la columna de agua fuera superior a la de la zona fótica, ya que el descenso de las células representaría un impacto negativo sobre el proceso de fotosíntesis (Kieffer et al., 2015). Como se mencionó en la sección de Materiales y Métodos, previo al ensayo se realizaron otros estudios con el mismo dispositivo para corroborar la sedimentación irreversible de las células (Romero et al., 2022), por lo que en trabajos futuros se podría indagar en recipientes con menor irradiación de luz al fondo y evaluar la viabilidad celular. Asimismo, en estas condiciones, el escalado en el volumen resultaría importante para obtener un mayor acercamiento a la determinación de la efectividad del tratamiento.

Kong et al. (2019) obtuvieron resultados en los que se observaron disminuciones en el tamaño, la granularidad interna, la integridad y la actividad de las células, revelando que el ultrasonido ejerció un daño severo en su estructura y función. En base a esto, podrían realizarse análisis en otros parámetros a nivel intracelular por MET, además del colapso de las vesículas, comparando la integridad celular en las células tratadas. En otros estudios, la microscopía de transmisión mostraba que las vesículas se recuperaban y quedaban intactas tal como antes de haber sido colapsadas. La eficiencia del ultrasonido en suspensiones dependía tanto de la frecuencia como de la potencia acústica,

considerando rangos de frecuencia entre 20 y 1146 kHz y distintas potencias, pero estas dependían de las propiedades mecánicas de las células de cada especie (Míguez, 2016).

Si bien en los resultados obtenidos por Romero et al. (2022) se observó que las células sedimentadas no recuperaban flotabilidad, el análisis por MET de las vesículas de gas en mayor tiempo postratamiento ampliaría considerablemente los resultados acerca de su comportamiento.

Según estos antecedentes, quedan por explorar diversos factores, como el rango de acción del dispositivo ultrasónico, para investigar el motivo del bajo porcentaje de células sedimentadas, evaluando tanto el volumen empleado como la distancia del transductor a la superficie. De esta manera podría ampliarse el conocimiento del mecanismo de acción del dispositivo e indagar en su factibilidad a mayor escala. También enfatizar en el efecto *a posteriori* del tratamiento por MET para indagar en la posible regeneración de las vesículas y en los daños en otras estructuras celulares.

CONCLUSIONES

En líneas generales, los resultados indicaron que, en las condiciones ensayadas y a 124 kHz y 20 W, hubo una disminución muy marcada en la composición de vesículas de gas (del 30 % de células sanas a 10 % en células tratadas), con su consecuente pérdida de flotabilidad. La obtención de datos numéricos concretos a nivel intracelular sobre el colapso de las vesículas de gas aporta una gran relevancia al estudio realizado, dada la escasez de resultados similares en los antecedentes.

Esto abre nuevas puertas a la implementación de esta metodología para el análisis de otras variables intracelulares y diferentes escenarios. La pérdida irreversible de flotabilidad a mayor escala de las células de *Microcystis* podría significar una posible aplicación de este tratamiento como complemento a herramientas para la regulación de floraciones de este género, pero resulta crucial profundizar sobre los efectos en las variables y condiciones discutidas anteriormente.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de Aguas Cordobesas S.A. También a la Administración Provincial de Recursos Hídricos por brindar los recursos necesarios para la elaboración de las actividades de laboratorio y de campo; a la Universidad Nacional de Córdoba por proveer el espacio, insumos e instalaciones, tanto desde la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales como la Facultad de Ciencias Químicas, y al personal del Laboratorio de Hidráulica por su cooperación intelectual y administrativa. Se hace mención especial y se agradece también al Centro de Microscopía Electrónica de la Universidad Nacional de Córdoba, que proveyó el instrumento y servicio específico de Microscopía Electrónica de Transmisión para la obtención de las micrografías.

REFERENCIAS

- American Public Health Association; American Water Works Association y Water Environment Federation, 2012. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23rd ed. Washington: APHA. Standard Method 10200.
- Bonanseña, M.; Bazán, R.; Germán, A.; Ferral, A.; Beltramone, G.; Cossavella, A. y Pinotti, L., 2021. Assessing land use and land cover change in Los Molinos reservoir watershed and the effect on the reservoir water quality. En: *J. South Am. Earth Sci.*, 108, 103243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103243>
- Daga, I. C.; Fernández Belmonte, M. C. y Reyna, S. M., 2021. Composición algal y bioindicadores de calidad de agua. Caso de estudio: Embalse San Roque, Córdoba. Argentina. En: *Cuadernos del CURIHAM.*, 26, pp. 1-11. DOI: <http://dx.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. y Deneff 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>
- Ferreira, A.; Romero, F. E.; Rodríguez, M. I.; Juaneda Allende, M.; Ruiz, M. A. y Rodríguez, 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: Argentina. pp. 568. [Consulta: 7 de marzo de 2024]. Disponible en: <https://conagua.ina.gov.ar/archivos/Libro-resumenes-CONAGUA2023.pdf>
- Halac, S. R.; Bazán, R. D. V.; Larrosa, N. B.; Nadal, A. F.; Ruibal-Conti, A. L.; Rodríguez, M. I.; Ruiz, M. A. y López, A. G., 2019. First report on negative association between cyanobacteria and fecal indicator bacteria at San Roque reservoir (Argentina): impact of environmental factors. En: *Journal of Freshwater Ecology*, 34(1), pp. 273-291.
- Halac, S.; Mengo, L.; Guerra, L.; Lami, A.; Musazzi, S.; Loizeau, J. L.; Ariztegui, D. y 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>
- Hobson, P.; Dickson, S.; Burch, M.; Thorne, O.; Tsybal, L.; House, J.; Brookes, J.; Chang, D.; Kao, S.; Lin, T.; Bierlein, K. y Little, J., 2012. *Alternative and innovative methods for source water management of algae and cyanobacteria* [En línea]. Denver: The Water Research Foundation. [Consulta: 30 de octubre de 2023]. Disponible en: <https://www.waterrf.org/resource/alternative-and-innovative-methods-source-water-management-algae-and-cyanobacteria-0>
- Huang, Y. R.; Li, L.; Wei, X. M.; Li, H. Z.; Zeng, J. Y. y Kuang, R., 2020. An investigation of mechanisms for the enhanced coagulation removal of *Microcystis aeruginosa* by low-frequency ultrasound under different ultrasound energy densities. En: *Ultrasonics Sonochemistry*, 69, 105278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105278>
- HW Group, 2014. *Hercules - Software for serial port terminal* [En línea]. Versión 3.2.8. Praga: HW Group. [Consulta: 1 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://www.hw-group.com/product-version/hercules>

- Image], 2023. *ImageJ* [En línea]. Versión 1.8.0. [s.l.]: [s.n.]. [Consulta: 1 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://imagej.net/>
- 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>
- Kong, Y.; Peng, Y.; Zhang, Z.; Zhang, M.; Zhou, Y. y Duan, Z., 2019. Removal of *Microcystis aeruginosa* by ultrasound: Inactivation mechanism and release of algal organic matter. En: *Ultrasonics Sonochemistry*, 56, pp. 447-457. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.04.017>
- 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>
- Mengo, L.; Deon, J.; Halac, S.; Foray, G.; Loizeau, J. L.; Ariztegui, D.; Chiavassa, S.; Adatte, T.; Pasquini, A.; Spangenberg, J.; Costamagna, I. y Piovano, E., 2024. Deciphering the intricate link between watershed-level land use changes and reservoir eutrophication in central Argentina over the 20th-21st century. En: *Anthropocene*, 100437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2024.100437>
- Míguez Caramés, D. M., 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>
- O'Farrell, I.; Motta, C.; Forastier, M.; Polla, W.; Otaño, S.; Meichtry, N. y Lombardo, R., 2019. Ecological meta-analysis of bloom-forming planktonic Cyanobacteria in Argentina. En: *Harmful Algae*, 83, pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.01.004>
- Peng, Y.; Zhang, Z.; Kong, Y.; Li, Y.; Zhou, Y.; Shi, X. y Shi, X., 2020. Effects of ultrasound on *Microcystis aeruginosa* cell destruction and release of intracellular organic matter. En: *Ultrasonics Sonochemistry*, 63, 104909. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104909>
- Rodríguez, M. I. y Ruiz, M. A., 2016. Limnology of the San Roque Reservoir. En: Wunderlin, D. A., ed. *The Suquía River Basin (Córdoba, Argentina)*. Cham: Springer. (The Handbook of Environmental Chemistry, vol. 62). DOI: https://doi.org/10.1007/978-2016_467
- Romero, F. E.; Ferreyra, A.; Marasas, M. S.; Juaneda Allende, M.; Gómez, M. G.; Constanzo, D.; Marconi G.; Vitulich C. A.; Ruiz Diaz, P.; Ceballos, M. L.; Rodríguez González S. A.; Halac, S. R.; Amé M. V.; Rodríguez, M. I. y Rodríguez, A., 2022. Elaboración de un dispositivo ultrasónico para control de floraciones algales del género *Microcystis* en el embalse San Roque, Córdoba: primeros pasos para evaluación de sus efectos. En: *IEEE. 2022 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*. San Juan, Argentina (7-9 setiembre 2022). San Juan: IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/ARGENCON55245.2022.9939993>
- Posit, 2023. *RStudio* [En línea]. Boston: Posit. Versión 6.1.0. [Consulta: 1 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://posit.co/download/rstudio/>
- 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 do Iguaçu: UNILA. [Consulta: 25 de julio de 2023].
Disponible en: <https://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/6029>
- Yang, Z.; Kong, F.; Shi, X.; Zhang, M.; Xing, P. y Cao, H., 2008. Changes in the morphology and polysaccharide content of *Microcystis aeruginosa* (Cyanobacteria) during flagellate grazing. En: *Journal of Phycology*, 44(3), pp. 716-720.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2008.00502.x>
- 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 línea]. En: *J Environ Biol.*, 34, pp. 331-335. [Consulta: 30 de octubre de 2023].
Disponible en: http://www.jeb.co.in/journal_issues/201304_apr13_supp/paper_07.pdf

Proliferación de plantas sumergidas en la Laguna Garzón: causas, consecuencias y recomendaciones de manejo

Proliferation of submerged plants in Laguna Garzón: causes, consequences and management

Proliferação de plantas submersas na Laguna Garzón: causas, consequências e gestão

 **LORENA RODRÍGUEZ-GALLEGO** (1)

 **CAROLINA LESCANO** (1)

 **SOLEDAD PASQUARIELLO** (1)

 **ELENA RODÓ** (2)

 **ANDREA CARDOSO** (1)

 **SEBASTIÁN SERRA** (1)

 **ANA MARTÍNEZ** (1)

 **SOLEDAD COSTA** (1)

 **MARIANA NIN** (2)

 **ANDRÉS FERNÁNDEZ** (3)

(1) Departamento de Sistemas Costeros y Marinos, Centro Universitario Regional del Este, Universidad de la República, Rocha, Uruguay.

(2) Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental, Ministerio de Ambiente, Montevideo, Uruguay.

(3) División Sistema Nacional de Áreas Protegidas, Dirección Nacional de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos, Ministerio de Ambiente, Montevideo, Uruguay.

RECIBIDO: 16/4/2024 → APROBADO: 19/8/2024 ✉ dunachirca@gmail.com

RESUMEN

A partir del verano de 2023, la Laguna Garzón registró un crecimiento excesivo de plantas sumergidas de *Myriophyllum quitense*, cubriendo toda la laguna, lo que afectó varios usos del sistema y generó preocupación social. Este trabajo describe la proliferación de plantas acuáticas, sus efectos en otras comunidades biológicas, las condiciones ambientales que la promovieron, y realiza recomendaciones para su gestión. La especie tolera salinidades bajas a moderadas y éste es el primer registro de una proliferación de esta magnitud en la laguna. La cobertura de plantas aumentó la transparencia y los nutrientes del agua, disminuyó el fósforo del sedimento y generó cambios en la comunidad bentónica. La

proliferación podría deberse a la alta disponibilidad de nutrientes en comparación con datos de la década del 2000 y al prolongado período con agua dulce en la laguna debido a la falta de conexión con el mar. Se sugiere realizar aperturas artificiales de la barra para descargar agua, sedimentos y plantas, permitiendo la entrada de agua salada que afecta a plantas y cianobacterias por su intolerancia a altas salinidades. La cosecha mecánica puede ser una medida complementaria en sitios puntuales. Se trata de medidas basadas en el funcionamiento natural del sistema y de bajo costo.

Palabras clave: eutrofización, lagunas costeras, *Myriophyllum quitense*.

ABSTRACT

Starting in summer 2023, Laguna Garzón registered excessive growth of submerged *Myriophyllum quitense* plants, covering the entire lagoon, which affected several uses of the system and generated social concern. This work describes the proliferation of aquatic plants, its effects on other biological communities, the environmental conditions that promoted it, and makes recommendations for its management. This species tolerates low to moderate salinities, and this is the first record of a proliferation of this magnitude in the lagoon. Plant cover increased water transparency and nutrients, reduced sediment phosphorus, and generated changes in the benthic community. The proliferation could be due to the high availability of nutrients compared to data from the 2000s and to the prolonged period with freshwater in the lagoon due to the lack of connection to the sea. It is suggested to make artificial openings of the sand bar with sufficient water levels to discharge water, sediments and plants, allowing the entry of marine water that affects plants and cyanobacteria due to their intolerance to high salinities. Mechanical harvesting can be a complementary measure in specific sites. These are measures based on the natural functioning of the system and of low cost.

Keywords: eutrophication, coastal lagoons, *Myriophyllum quitense*.

RESUMO

A partir do verão de 2023, a Laguna Garzón registrou um crescimento excessivo de plantas submersas de *Myriophyllum quitense*, cobrindo toda a lagoa, o que afetou diversos usos do sistema e gerou preocupação social. Este trabalho descreve a proliferação de plantas aquáticas, seus efeitos em outras comunidades biológicas, as condições ambientais que a promoveram e faz recomendações para seu manejo. Esta espécie tolera salinidades baixas a moderadas e este é o primeiro registro de uma proliferação desta magnitude na lagoa. A cobertura vegetal aumentou a transparência da água e dos nutrientes, reduziu o fósforo nos sedimentos e gerou alterações na comunidade bentônica. A proliferação pode dever-se à elevada disponibilidade de nutrientes face aos dados da década de 2000 e ao período prolongado com água doce na lagoa devido à falta de ligação ao mar. Sugere-se fazer aberturas artificiais na barra com níveis de água suficientes para escoamento de água, sedimentos e plantas, permitindo a entrada de água salgada que afeta plantas e cianobactérias devido à sua intolerância às salinidades elevadas. A colheita mecânica pode

ser uma medida complementar em locais específicos. Estas são medidas baseadas no funcionamento natural do sistema e de baixo custo.

Palavras-chave: eutrofização, lagunas costeras, *Myriophyllum quitense*.

INTRODUCCIÓN

La causa fundamental del desarrollo explosivo de productores primarios en ecosistemas acuáticos es la eutrofización, que se define como el enriquecimiento natural o artificial de nutrientes de los cuerpos de agua, principalmente con nitrógeno y fósforo (National Academy of Science, 1969; Quinlan et al., 2020). El aumento de la disponibilidad de nutrientes acelera el crecimiento del fitoplancton y de plantas acuáticas, que puede tener consecuencias a largo plazo muy nocivas para los ecosistemas como la presencia de especies de cianobacterias tóxicas, reducción del oxígeno en agua, mortandad de peces y pérdida de biodiversidad en general (Heisler et al., 2008; O'Neil et al., 2012). Esto reduce progresivamente la resiliencia del ecosistema acuático, volviéndose más vulnerable frente a perturbaciones naturales y al cambio climático (Scheffer et al., 2001; Moss et al., 2011; Meerhoff et al., 2022).

La eutrofización es la amenaza principal de los sistemas acuáticos a nivel mundial (Hwang, 2020; Meerhoff et al., 2022), y en las lagunas costeras de Sudamérica en particular (Esteves et al., 2008). En lagunas costeras, que se caracterizan por el intercambio intermitente del agua con el océano a través de la apertura de un canal en una barra arenosa (Kjerfve, 1994; McSweeney et al., 2017), y en estuarios en general, la eutrofización promueve una sucesión o alternancia a lo largo del tiempo de productores primarios, que puede derivar en la proliferación de plantas sumergidas, algas filamentosas epífitas, microalgas coloniales y macroalgas marinas; finalmente puede terminar dominando el fitoplancton potencialmente tóxico (McGlathery, 2001; O'Neil et al., 2012). La alternancia de productores primarios ha sido observada en las cuatro lagunas costeras de Uruguay (José Ignacio, Garzón, de Rocha y de Castillos) (Rodríguez-Gallego et al., 2017 y observaciones no publicadas) y reportada mundialmente (McGlathery, 2001; Pérez-Ruzafa et al., 2019). Estos cambios alteran el funcionamiento ecológico, las tramas tróficas y la provisión de servicios ecosistémicos, comprometiendo las pesquerías costeras (McGlathery, 2001).

El proceso de eutrofización se considera relativamente reversible si la carga externa de nutrientes que reciben los cuerpos de agua desde la cuenca se reduce. Sin embargo, dependiendo del sistema y de la carga de nutrientes en los sedimentos y los suelos de la cuenca, la recuperación puede demorar cientos de años (Carpenter et al., 2005). El proceso de apertura de la barra en las lagunas costeras puede comportarse como un mecanismo natural de remoción de nutrientes y materia orgánica, debido al arrastre y eyección de sedimentos y grandes volúmenes de agua enriquecida en nutrientes hacia el mar, y el posterior ingreso de agua marina pobre en nutrientes.

Rodríguez-Gallego et al. (2017) registraron una relación inversa entre la concentración de nutrientes en agua y sedimento con la salinidad en las lagunas costeras de Uruguay. Debido a esto, el manejo antrópico de la barra de la Laguna de Rocha busca imitar lo máximo posible al sistema natural de apertura y conexión con el océano. Es decir,

cuando se alcanzan los máximos valores de nivel del agua en la laguna -sin que generen afectaciones en viviendas y campos ganaderos- se habilita la apertura artificial de la barra, en caso de que no se produzca previamente una apertura natural (Conde et al., 2019). Un manejo con criterios similares es el propuesto en la Laguna Garzón por el Ministerio de Ambiente (protocolo de manejo de la barra en proceso de aprobación). A diferencia de los lagos sin conexión al mar, en las lagunas costeras el mecanismo de intercambio de agua con el mar permite regular, por un lado, la carga de nutrientes del sistema y, por otro, la abundancia de productores primarios debido a la variabilidad de la salinidad que los afecta (Odebrecht et al., 2008; Abreu et al., 2009). Por ejemplo, las cianobacterias tienen baja tolerancia a la salinidad y a su variabilidad (Cabrera et al., 2013), al igual que las plantas sumergidas (Rodríguez-Gallego et al., 2015), por lo que se hipotetiza que el manejo de la barra de las lagunas costeras puede ser determinante en el mantenimiento de la calidad del agua.

En la Laguna Garzón se registró un crecimiento excesivo de plantas sumergidas a partir del verano de 2023, causado por la especie *Myriophyllum quitense* Kunth de la familia Haloragaceae. Este crecimiento ha afectado severamente varios usos del sistema como la pesca artesanal y los deportes náuticos como el kitesurf, y ha generado preocupación en la opinión pública. El desarrollo de la planta comenzó en los bolsones de la desembocadura de los afluentes A° La Cruz y A° Garzón, en el noreste de dicha laguna; desde entonces avanzó hacia la laguna en el verano de 2023 y ya en otoño cubrió prácticamente todo el cuerpo de agua hasta el brazo de la desembocadura y la Laguna de Anastasio, situación que se mantuvo hasta marzo de 2024.

Se trata del primer registro de una proliferación de esta magnitud en la Laguna Garzón, ya que no hay reportes históricos de habitantes locales (pescadores artesanales y productores agropecuarios, comunicación personal) ni en estudios del registro histórico de polen (Rodríguez-Gallego et al., 2012). Incluso Carvalho et al. (2024), en un exhaustivo estudio paleolimnológico de esta laguna que abarcó un período de 5024 años hasta el presente, reportaron que la composición de la materia orgánica fue muy estable entre milenios sin registro de picos de materia orgánica, polen u otros indicadores de aumento severo de la producción primaria en el sistema. Esto indicaría que otros procesos están ocurriendo en la cuenca y en la laguna que podrían promover el crecimiento de estas plantas.

Myriophyllum quitense es una especie sumergida enraizada de la que emerge hacia afuera del agua únicamente el tramo final del tallo con hojas modificadas y flores. Tolera niveles de salinidad bajos a medios (Orchard, 1981), no mayores a 14 (McAlpine et al., 2007). En Uruguay fue registrada en tres lagunas costeras con conexión al mar (Garzón, de Rocha y de Castillos, Rodríguez observación personal) y en la Laguna del Diario (Kruk et al., 2006), aunque también hay registros históricos en humedales de Montevideo y San José (Alonso-Paz y Bassagoda, 2006). En la Laguna de Rocha, la especie alcanzó sus máximas abundancias con salinidades menores a 10, pero llegó a tolerar salinidades de 16, aunque con valores de biomasa marginales (Rodríguez-Gallego et al., 2015).

En la Laguna del Diario fue registrada ocupando gran parte de la superficie y columna de agua (Vianna, 2012), pero en condiciones de muy baja salinidad (promedio de 0.3, datos convertidos de conductividad a salinidad). En la Laguna de Rocha fue reportada una proliferación de plantas sumergidas en verano de 2003 en el bolsón noreste, donde fue predominante en las bahías más cercanas a la orilla, con valores de biomasa de hasta 307

gPsm² (Rodríguez-Gallego et al., 2010, 2015). Esta proliferación de plantas desapareció a partir de una apertura de la barra, coincidiendo con el aumento de la salinidad. Proliferaciones similares habían sido reportadas previamente en 1997 y 2001 (Rodríguez-Gallego et al., 2010), en especial de *Egeria densa* Planch. en la desembocadura del A° Rocha, aunque ninguna tan extensa. Desde 2003 no fueron registradas proliferaciones similares en la Laguna de Rocha.

En coincidencia temporal con la proliferación en Garzón, en invierno de 2023 se registró una abundancia inusual de *M. quitense* en el bolsón del Chafalote, en la Laguna de Castillos, la que alcanzó su máxima cobertura en verano de 2024 a salinidades entre 0 y 1, cubriendo prácticamente la totalidad del bolsón. Esto indicaría que los procesos que están fomentando la proliferación de plantas sumergidas pueden estar ocurriendo -con diferentes magnitudes- en todas las lagunas costeras del país, y por lo tanto entender las causas permitiría aplicar medidas de manejo antes de que los cambios sean irreversibles.

Este trabajo tiene como objetivo describir la proliferación de plantas sumergidas en la Laguna Garzón desde su aparición y hasta el verano de 2024, las condiciones ambientales actuales y los cambios en el tiempo que podrían explicar su desarrollo, así como los efectos en otras comunidades acuáticas y las posibles medidas de gestión para mitigar este impacto.

Área de estudio

La Laguna Garzón se ubica en la costa Este de Uruguay y constituye el límite departamental entre Rocha y Maldonado; tiene una superficie de 1.750 ha y una cuenca que se extiende por 56.000 ha (Figura 1). Está categorizada como Área de Manejo de Hábitats y/o Especies Decreto 341/014 (Uruguay, 2014) del Sistema Nacional de Áreas Protegidas, e integra la Reserva de Biosfera Bañados del Este. Esta laguna recibe la desembocadura del A° Garzón y la Cañada de la Cruz que forman ensenadas muy extensas, mientras que la Cañada de Anastasio en el sector noroeste tiene dos bolsones asociados -uno de ellos denominado Laguna de Anastasio- que poseen una importante influencia salina desde la laguna.

Estas zonas presentan importantes humedales de agua dulce y salobre, y muy alta biodiversidad de plantas acuáticas (Rodríguez-Gallego et al., 2023) y aves. En la Figura 1 se muestra el mapa de coberturas y usos del suelo de la cuenca, donde se destaca la superficie de bosque nativo y matorral psamófilo, principalmente en la cuenca alta asociada a la serranía y a los cursos de agua, y en la cuenca baja asociada a la laguna y zona costera. También se observan humedales que ocupan el 3.5 % de la superficie de la cuenca. Las dunas y arenales se ubican en la costa marina y desembocadura de la laguna. El campo natural es el ecosistema predominante (68.3 % de la superficie) y se utiliza para la ganadería extensiva, mientras que los siguientes usos productivos del suelo en importancia son la forestación para fines comerciales (8.6 % de la cuenca) y la agricultura (8.2 %).

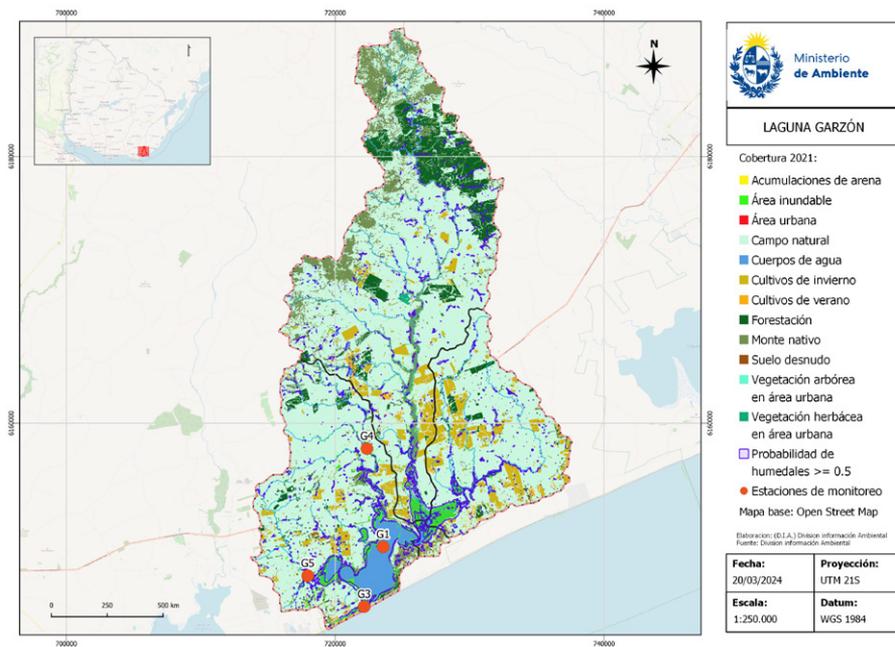


FIGURA 1. Coberturas vegetales y usos del suelo en la cuenca de la Laguna Garzón. Los puntos rojos indican los sitios de muestreo. Fuente: elaborado por la División Información Ambiental del Ministerio de Ambiente (DIA-MA).

MATERIALES Y MÉTODOS

La información presentada y analizada en este trabajo surge del Convenio interinstitucional de colaboración técnico-científica entre el Ministerio de Ambiente (MA, Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental, DINACEA) y la Universidad de la República (Centro Universitario Regional Este, CURE) para el monitoreo de la calidad ambiental de las lagunas costeras. Este monitoreo se realiza estacionalmente desde 2017 en la Laguna Garzón, aunque el CURE registra relevamientos estivales desde 2015. Los sitios de muestreo se ubican en el sur, cercano al puente, y en la zona norte (Figura 1). Los datos del monitoreo se reportan en el Observatorio Ambiental Nacional.

Asimismo, se compararon los datos fisicoquímicos históricos existentes con un período de datos actuales pero anteriores a la aparición de las plantas. Los datos históricos fueron generados entre 2002 y 2006 por la Sección Limnología de la Facultad de Ciencias (Conde et al., 2003; Rodríguez-Gallego et al., 2017), ver (Uruguay. Ministerio de Ambiente et al., 2021) para una descripción detallada de los datos analizados. La comparación se realizó con los valores disponibles entre febrero de 2015 y diciembre de 2020, para reducir el efecto del desbalance de datos en la comparación y además evitar el sesgo introducido por la presencia de plantas.

Esta comparación se realizó empleando análisis de varianza de una vía, previo testeo de la homocedasticidad y normalidad, y la comparación se realizó mediante el test de Tukey de acuerdo con Zar (1999). De no cumplirse alguno de dichos supuestos se empleó test de Kruskal y Wallis. Adicionalmente, se realizaron correlaciones de spearman entre

variables. Los análisis se realizaron con el software R versión 2.15.1 (R Development Core Team, 2012).

El relevamiento de organismos del sedimento (organismos bentónicos y plantas sumergidas) se realizó empleando una draga Ekman, tomando una única muestra por sitio. Dichas muestras se tamizaron con una malla de 0.5 mm, se preservaron en alcohol 95° hasta su posterior análisis bajo lupa estereoscópica, donde los organismos se clasificaron hasta el menor nivel taxonómico posible. A partir de que aparecieron plantas sumergidas, las muestras de biomasa de plantas se tomaron por triplicado con el uso de un cuadrante de madera flotante (muestreos de mayo, agosto y noviembre de 2023 y febrero de 2024), colectando toda la biomasa contenida en la columna de agua dentro de dicho cuadrante.

La biomasa de plantas sumergidas se determinó a partir del peso de las plantas colectadas en cada sitio de muestreo, luego de escurrir el exceso de agua. La determinación del peso seco consistió en tomar una submuestra de la biomasa fresca, la cual se secó en estufa a 60 °C durante 48 horas y se registró el peso fresco y seco (Arocena, 2016). Este valor fue posteriormente extrapolado a la muestra entera y a 1 m².

El contenido de fósforo y nitrógeno de la biomasa de plantas se estimó a partir de valores obtenidos de la bibliografía para *Myriophyllum spicatum* L. (única del género para la que se reporta dicha información; nitrógeno = 3.5 % del peso seco de plantas (Nichols y Keeney, 1976) y fósforo = 0.25 % (Schmitt y Adams, 1981). Se estimó la masa de nutrientes contenida en la vegetación sumergida para el invierno de 2023, extrapolando el contenido de nutrientes en las plantas por m² a la superficie vegetada. La superficie vegetada empleada fue de 239 ha, obtenida mediante el análisis de una imagen satelital de Sentinel 2 del 21 de julio de 2023 (información brindada por el Ministerio de Ambiente de Uruguay).

En cada sitio se midió *in situ* temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, saturación de oxígeno, pH y turbidez (sonda Horiba U-52), y se determinó la profundidad del disco de Secchi. Las muestras de agua para determinación de nutrientes, sólidos suspendidos, materia orgánica y clorofila *a* fueron colectadas por debajo de la superficie del agua con un bidón y trasladadas al CURE en oscuridad y frío para su posterior procesamiento.

Las muestras de sedimento fueron obtenidas de la muestra intacta colectada con la draga Ekman a 0.5 cm de profundidad para clorofila *a* y a 1 cm para nitrógeno, fósforo y materia orgánica. Se determinaron los siguientes nutrientes para agua: fósforo total PT (Valderrama, 1981 y Murphy y Riley, 1962), nitrógeno total NT (Valderrama, 1981; Mackereth et al., 1978), nitrato NO₃ (Mackereth et al., 1978), nitrito NO₂ (Bendschneider y Robinson, 1952), amonio NH₄ (Koroleff, 1970); y en sedimento: fósforo total PT (Valderrama, 1981 y Murphy y Riley, 1962) y nitrógeno total NT (Valderrama, 1981; Müller y Weideman, 1955). También se cuantificaron los sólidos en suspensión SS (American Public Health Association, et al., 2012) y la materia orgánica asociada MOS (American Public Health Association, et al., 2012), así como la materia orgánica del sedimento, ambas por ignición MO sed (United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2014), la concentración de clorofila *a* del agua Clo-*a* (Jespersen y Christoffersen, 1987) y del sedimento Clo-*a* sed (Lorenzen, 1967). Se consideró como nitrógeno inorgánico disuelto (NID) a la suma de nitrato, nitrito y amonio.

El fitoplancton fue colectado de agua superficial y fijado en Lugol, y mediante un arrastre de 2 minutos con una red de 100 µm equipada con flujómetro y fijado en

formaldehído al 4 % para la detección temprana de cianobacterias, de acuerdo con Kruk et al., 2015 y Segura et al., 2017. La muestra de fitoplancton obtenida con la red de 100 μm se analizó en el microscopio invertido en cámaras de conteo de Sedgewick Rafter de 1 ml, la identificación de los organismos se realizó hasta el menor nivel de clasificación posible y se estimó la concentración de organismos por volumen de agua filtrada. La muestra de agua subsuperficial se analizó por el clásico método Utermöhl (1958) en cámaras de sedimentación de 25 ml.

Para determinar la extensión de la floración de cianobacterias y de plantas sumergidas en el verano de 2024 se realizó el análisis de imágenes satelitales. Se distinguió entre ambos tipos de organismos utilizando las distintas intensidades de color relacionadas con absorciones espectrales diferenciales de los pigmentos específicos, como la fiocianina (cianobacterias) y la clorofila *a* (plantas sumergidas).

Asimismo, se describió el estado de la barra arenosa durante el período de estudio, indicando el tiempo que permaneció abierta y cerrada. Los datos fueron brindados por el personal de guardaparques del área protegida, quienes llevan un registro diario del estado de la barra.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción de la proliferación de plantas sumergidas

La aparición de *M. quitense* en cantidades inusuales fue registrada en noviembre de 2022, y su crecimiento comenzó a acelerarse desde el verano de 2023, tanto en biomasa como en distribución, dispersándose hacia el centro y sur de la laguna para el otoño siguiente (Figura 2). El máximo valor promedio de biomasa registrado fue de 2815.8 ± 787.6 gPS/ m^2 en primavera de 2023, manteniendo valores muy elevados hasta el verano de 2024. A partir de un evento de lluvia a mediados de febrero de 2024 comenzó un retroceso de *M. quitense* y para marzo se restringía a la zona centro, sur y la Laguna de Anastasio.

En las etapas iniciales de la proliferación de plantas se registraron, además de *M. quitense*, dos especies de macroalgas Charophytas (*Nitella sp.* y *Chara sp.*) comúnmente encontradas en las Lagunas de Rocha y de Castillos; pero a partir de otoño *M. quitense* fue la única especie registrada.

Este constituye el primer registro de vegetación sumergida ocupando gran parte del cuerpo de agua en la Laguna Garzón, siendo los registros previos correspondientes a zonas con vegetación sumergida de *Zannichellia palustris* (Santana y Fabiano, 1999), y áreas con *Ruppia maritima* en el NE, en 2003 (Rodríguez-Gallego, observación personal). El registro polínico histórico (Rodríguez-Gallego et al., 2012) muestra que especies de la familia de las Haloragaceae y *R. maritima* estuvieron presentes en el pasado, con fluctuaciones importantes y con una tendencia a reducir su presencia hasta la actualidad. Si bien se han reportado proliferaciones de plantas sumergidas en lagunas de Uruguay, como la de *Egeria densa* Planch. en la Laguna Blanca (Mazzeo et al. 2003) y de esta misma especie en las lagunas de Rocha (Rodríguez-Gallego et al., 2015) y del Diario (Kruk et al., 2006 y Vianna, 2012), este crecimiento tan rápido y abarcador no había sido reportado previamente.

Es interesante señalar que los estudios de proliferación de plantas en nuestro país indican que ocurrieron luego de eventos de sequía relevantes. Esto fue señalado en la Laguna Blanca (Mazzeo et al., 2003), de Rocha (Rodríguez-Gallego et al., 2015) y del Diario (Inda et al., 2016). Si bien la sequía registrada en Uruguay en 2022 y 2023 (Instituto Uruguayo de Meteorología, 2023) no generó una reducción dramática del nivel de agua de las lagunas, la ausencia de eventos de lluvia no permitió alcanzar los niveles que desencadenan la apertura de las barras y eso habría ocasionado condiciones favorables para el desarrollo de plantas sumergidas (nivel del agua relativamente alto, estable en el tiempo y baja salinidad). Esto explicaría por qué esta especie también proliferó en la Laguna de Castillos, indicando que hay condiciones que no dependen de la situación puntual de cada laguna.

Igualmente, Carvalho et al. (2024) reportaron un evento de sequía en la década del 1970 en el registro paleolimnológico de la Laguna Garzón, pero no observaron cambios en el registro sedimentario que pudieran asociarse a proliferaciones de productores primarios de la magnitud observada actualmente; lo cual indicaría que si bien el clima puede influir existen otros factores que estarían explicando los eventos de proliferación de plantas.

El contenido de nitrógeno y fósforo en la biomasa total estimada de plantas en invierno de 2023 fue de 34.7 ± 12.9 ton para el nitrógeno y 2.5 ± 0.9 ton para el fósforo. Estos valores subestiman la carga total ya que en el muestreo de campo, en una fecha muy cercana a la de la imagen empleada (9 de agosto de 2023), la zona vegetada era considerablemente mayor a la registrada por la imagen. El mapeo de vegetación sumergida empleando imágenes satelitales presenta limitaciones debido a la profundidad y turbidez del agua, por lo cual debe ser considerado una estimación aproximada (Zweig et al., 2015). Igualmente, los resultados muestran la magnitud de los nutrientes acumulados en la biomasa de plantas, que pueden ser rápidamente intercambiados con el sedimento o quedar disponibles en la columna de agua para ser incorporados por otros productores primarios, como perifiton o fitoplancton. Los resultados evidencian el riesgo de empeoramiento de la condición actual de la laguna en caso de que mueran las plantas y se produzca una liberación de nutrientes.

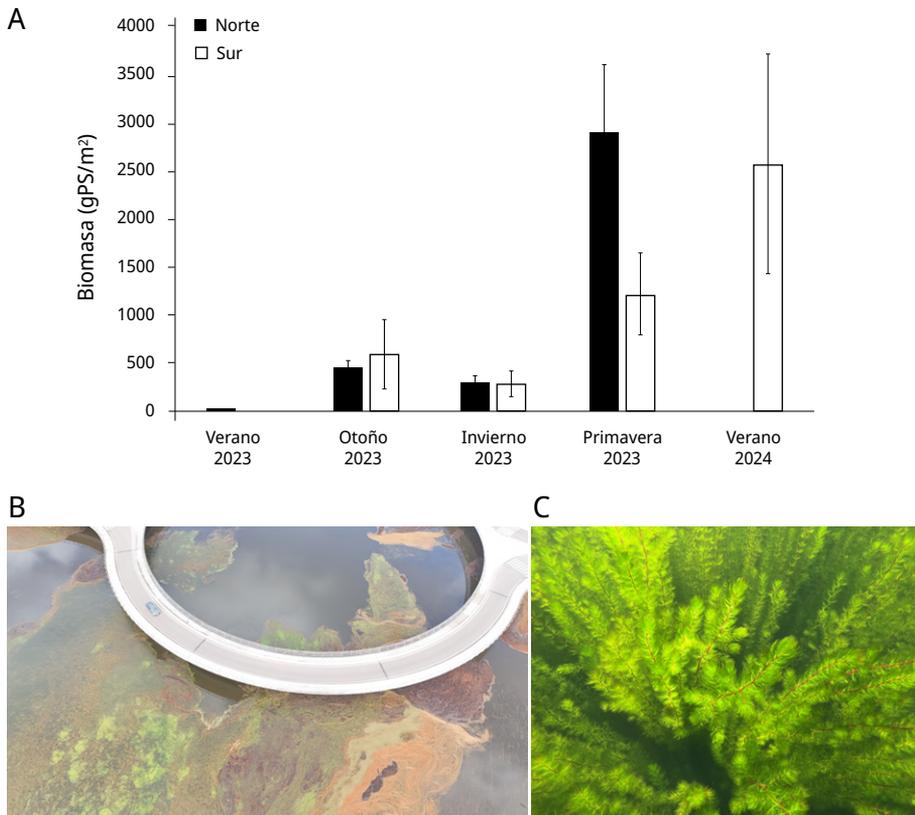


FIGURA 2. A) Promedio y desvío estándar de biomasa seca de *Myriophyllum quitense* en la Laguna Garzón expresada en g de peso seco/m² (gPS/m²). B) Foto de la proliferación de plantas tomada con dron. C) Foto de las plantas tomada debajo del agua.

Características ambientales y de otras comunidades biológicas antes y durante la proliferación de plantas sumergidas

En el período con plantas (2023 - 2024) se observó una reducción notoria de los valores de salinidad (Tabla 1 y Figura 3) respecto del período sin plantas. Si bien en términos promedios en el período previo a la proliferación de las plantas la salinidad estuvo dentro del rango de tolerancia de la especie (ca. 10), al mirar los datos brutos se observa que todos los años tuvieron eventos de salinidad elevada y por encima de dicho valor, y que a partir de la primavera de 2022 comenzó un período prolongado de muy baja salinidad que se extendió hasta la actualidad. Aunque la serie de datos no captó un aumento importante de salinidad en la última apertura de la barra en invierno de 2022, fue evidenciado en la comunidad de fitoplancton que mostró una importante influencia marina (se presentó una floración de dinoflagelados marinos que estaba ocurriendo en las aguas costeras en ese momento). Este evento podría haber sido suficiente para evitar la proliferación de plantas sumergidas en ese momento, dado que desde otoño de 2021 la salinidad fue muy baja.

Durante ambos períodos analizados, la profundidad del agua fue relativamente alta (Rodríguez-Gallego et al., 2017). Una diferencia muy notoria entre períodos fue

el aumento de la transparencia del agua (Tabla 1), probablemente consecuencia de la presencia de las plantas que reducen la turbulencia del agua provocada por el viento y favorecen la sedimentación. Este efecto se registró en la proliferación de plantas sumergidas en la Laguna de Rocha (Rodríguez-Gallego et al., 2010), y ha sido ampliamente reportado en la bibliografía (James et al., 2004), pero no fue hallado en proliferaciones similares en lagunas de agua dulce de nuestro país (Vianna, 2012, Mazzeo et al., 2003).

También se registró un aumento notorio del pH entre períodos, lo cual es un efecto esperable debido al aumento de la fotosíntesis de las plantas (Bornette y Pujalon, 2011). El oxígeno disuelto y la saturación en agua aumentó levemente, también producto de la fotosíntesis de la masa de plantas, aunque mediciones nocturnas y cercanas al sedimento podrían arrojar menores valores como fue registrado en otros casos en Uruguay (Mazzeo et al., 2003). La temperatura del agua estuvo dentro del rango estacional esperado (Tabla 1).

TABLA 1. Comparación de las condiciones ambientales de la Laguna Garzón en los períodos sin vegetación (izquierda) y con vegetación (derecha) sumergida. de: desvío estándar.

Período	2015-2022 (n = 54)		2023-2024 (n = 9)	
	promedio	de	promedio	de
Z (m)	1.5	0.5	1.8	0.4
Disco de Secchi (m)	0.9	0.4	1.3	0.4
T (°C)	18.9	5.2	18.8	5.5
Salinidad	7.7	6.6	3.1	2.3
pH	7.9	0.4	9.7	0.7
OD (mg/L)	8.2	1.3	9.4	2.5
Sat O ₂ (%)	91.0	8.0	99.6	23.0
Turbidez (UNT)	20.2	24.8	4.0	6.7
Clo- <i>a</i> (µg/L)	5.2	3.9	3.1	2.3
SS (mg/L)	22.5	23.7	8.2	12.2
PO ₄ (µgP/L)	21.1	23.8	42.7	35.8
PT (µgP/L)	70.4	50.5	85.2	47.2
NT (µgN/L)	670.8	286.3	871.4	172.6
NID (µgN/L)	93.6	117.1	64.0	72.4
Clo- <i>a</i> sed (µg/gPS)	21.7	19.4	8.3	4.8
MO sed (%)	6.9	3.5	4.6	2.5
PT sed (µgP/gPS)	205.6	104.1	154.9	84.1
NT sed (µgN/gPS)	229.7	206.3	298.4	290.9

Se observó una tendencia de aumento del fósforo en el agua, especialmente para el fósforo disuelto, aunque menos marcado para el fósforo total. Si bien el nitrógeno total también mostró una tendencia en aumento, el nitrógeno disuelto presentó la tendencia opuesta. A nivel del sedimento el comportamiento de los nutrientes fue el inverso, el fósforo total mostró una disminución mientras que el nitrógeno total mostró un leve aumento, al igual que lo reportado en la proliferación de plantas en la Laguna Blanca (Mazzeo et al., 2003).

Estos resultados muestran la importancia de las plantas sumergidas en la dinámica de los nutrientes del sistema, donde el fósforo reservado en el sedimento se puede mover hacia el tejido de las plantas y de ahí al agua, reduciendo la concentración en el sedimento superficial, pero dejándolo más disponible en la columna de agua. Si bien el nitrógeno también se moviliza entre dichos compartimentos, posiblemente en presencia de macrófitas se favorezcan procesos de fijación de nitrógeno. Por otra parte, la clorofila *a* en agua y en sedimento se vio reducida comparando el período con y sin plantas.

Mazzeo et al. (2003) y Vianna (2012) no encontraron diferencias significativas en la clorofila *a* del agua en zonas vegetadas en comparación con zonas no vegetadas, con excepciones en algunos meses. Vanderstukken et al. (2011) describen una serie de interacciones negativas de las plantas sumergidas sobre el fitoplancton en mesocosmos realizados en Uruguay, como ser competencia por nutrientes, alelopatía, reducción de la turbidez, entre otros. Igualmente, esta dinámica debería ser analizada en mayor profundidad.

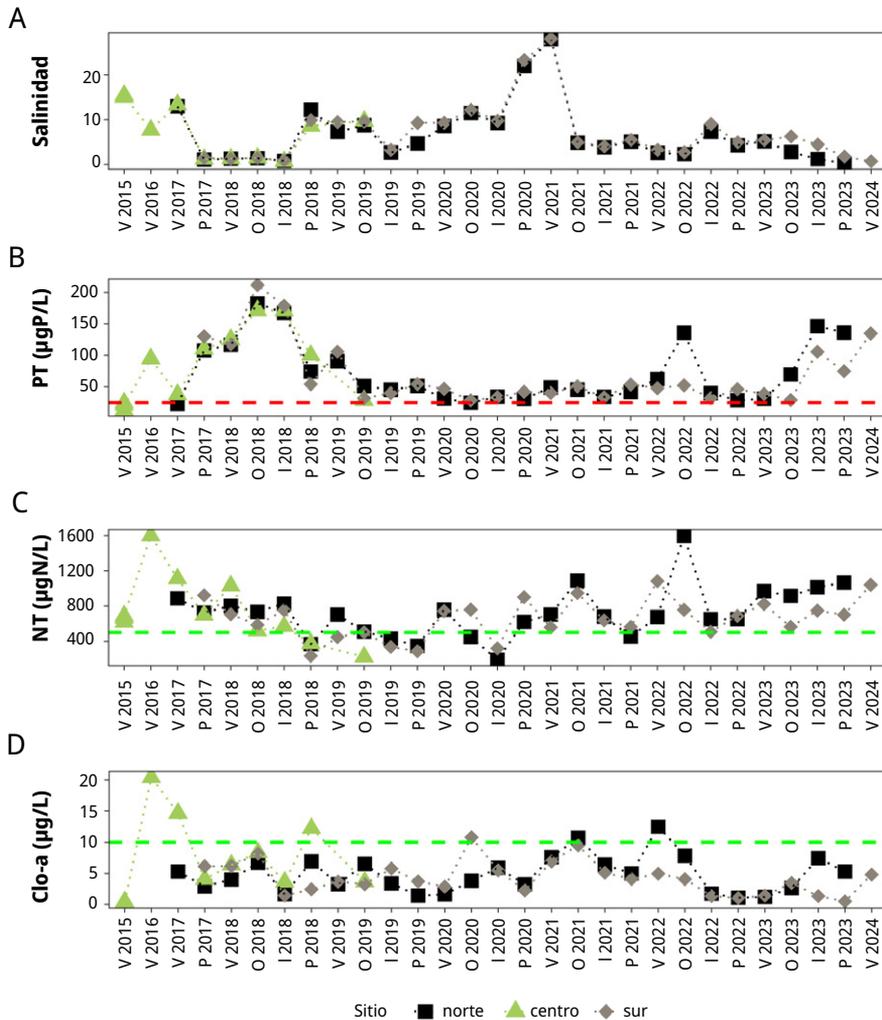


FIGURA 3. Variación temporal y espacial de: A) salinidad, B) fósforo total (PT), C) nitrógeno total (NT), y D) clorofila *a* (Clo-*a*) del agua en el período de monitoreo (de febrero de 2015 a febrero de 2024). La línea punteada roja indica el límite establecido por la clase 3 del Decreto 253/79 (Uruguay, 1979) de calidad del agua. La línea punteada verde indica el valor guía establecido por la Mesa Técnica del Agua (Uruguay. Ministerio de Ambiente, Dirección Nacional de Medio Ambiente, 2017). V: verano, O: otoño, I: invierno, P: primavera.

A lo largo del período muestreado, la comunidad bentónica (2017-2024) en general estuvo dominada por el caracol *Heleobia* aff. *australis*, por los poliquetos *Heteromastus* cf. *similis* y *Nephtys fluviatilis*, y en menor medida por el bivalvo *Erodona mactroides*. Esta composición es típica de comunidades estuarinas de nuestra costa y se ha mantenido muy similar a estudios previos de esta laguna (Meerhoff et al., 2013). Sin embargo, en el período con plantas ocurrieron cambios en la abundancia y composición de los taxa. Se observaron picos de diversidad y abundancia de diversos grupos de crustáceos

previamente poco abundantes y de presencia ocasional, como ostrácodos, anfípodos, tanaidáceos e isópodos.

Heleobia aff. *australis*, ítem dominante del sistema, presentó una marcada disminución en su abundancia, sobre todo en la zona norte, pasando de 4000-6000 ind/m² a menos de 100 ind/m² a partir de la primavera de 2023, sumado a la ausencia de registros de *H. cf. similis*, *N. fluviatilis* y *E. mactroides*. A su vez, aparecieron varios taxa no reportados previamente o que aumentaron notoriamente su abundancia relativa, algunos de ellos de sistemas dulceacuícolas y asociados a vegetación acuática, como larvas de quironómidos, ninfas de odonatos, camarones de agua dulce y caracoles dulceacuícolas de género *Biomphalaria* y *Heleobia*. Lo mismo ocurrió con la comunidad de fitoplancton que en 2023 presentó organismos más asociados a sistemas típicos de agua dulce, como *Volvox* sp., *Pediastrum* spp., *Monoraphidium* spp., con una gran abundancia de *Cryptomonas*.

A comienzos de febrero de 2024 (7/2/24 posterior al monitoreo de verano) se detectó la ocurrencia de una floración de cianobacterias en la ensenada del A° Garzón. El análisis cualitativo de una muestra colectada por los guardaparques del área constató la presencia de varias especies del género *Dolichospermum* (potencialmente tóxico): *D. planctonicum*, *D. circinalis* y *D. spiroides*, siendo la primera la dominante. Posteriormente, se colectó una muestra del mismo sitio (1/3/2024) para el análisis de toxinas en el Laboratorio de DINACEA (MA). Se registraron concentraciones cuantificables de microcistina LR (4.6 µg/L) y saxitoxina (1.0 µg/L), aunque por debajo de los valores límite recomendados para aguas de recreación, según la Organización Mundial de la Salud (Chorus y Welker, 2021), mientras que fue indetectable la cilindrospermopsina. Cabe mencionar que al momento de la toma de la muestra para toxinas la densidad de la floración había disminuido, correspondiendo al estadio 1 de acuerdo con el monitoreo visual (Uruguay. Ministerio de Ambiente, Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental, 2020).

Por otro lado, se realizó una evaluación de la floración de cianobacterias entre el 06/02/24 y el 07/03/24 a través de imágenes satelitales (Figura 4). Allí se observó que la floración de cianobacterias se ubicó al inicio en la zona norte y de ahí avanzó hacia el centro de la laguna, mientras que la zona sur de la laguna se mantuvo dominada por las plantas sumergidas y sin floración. En febrero (imágenes: 6/02/24 -16/02/24) se estimó para la floración una superficie aproximada de 4.7 km², lo cual corresponde al 25 % del área de la laguna, aumentando a 32 % (5.7 km²) en el mes de marzo (imagen: 07/03/24). Odebrecht et al. (2005) encontraron en la Laguna de Los Patos que durante una sequía extrema causada por la Niña aumentó la abundancia de cianobacterias debido al reducido aporte de sílice desde la cuenca que habría afectado a las diatomeas, grupo que generalmente predomina en estas lagunas. Es probable que en la Laguna Garzón esté ocurriendo un efecto similar causado por la sucesión de años secos.



FIGURA 4. Análisis de la floración de cianobacterias en la Laguna Garzón a través de imágenes satelitales, se ordenan por fecha de izquierda a derecha (6/02/24, 16/2/2024, 07/03/2024). El color rosado de la mitad SO dentro de la laguna representa a las plantas sumergidas, mientras que el color verde de la mitad NE dentro de la laguna representa a la floración de cianobacterias.

Efectos del intercambio de agua con el mar

En el período de estudio abarcado, el número de aperturas de la barra de la Laguna Garzón osciló entre una vez (2022) y seis (2018), siendo 2023 el único año en que no tuvo conexión con el mar. En cuanto a la duración de la conexión laguna-mar, se registraron períodos de barra abierta de entre 9 (2018) y 54 días (2019). La frecuencia de apertura y el número total de días de barra abierta es muy variable entre años y también a lo largo del año, pudiendo haber varios meses sin conexión con el océano.

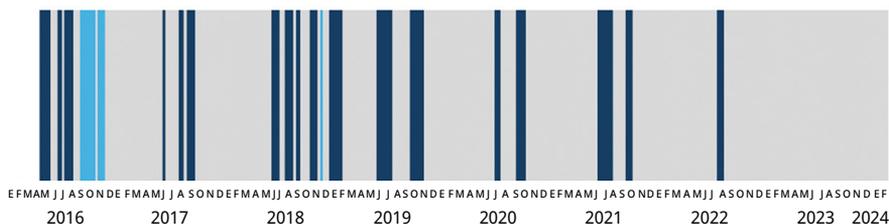


FIGURA 5. Estado de la barra de la Laguna Garzón desde abril de 2016 hasta marzo de 2024. Gris: estado de barra cerrada, azul oscuro: período de barra abierta (artificialmente), y celeste: período de barra abierta naturalmente.

Actualmente el sistema se encuentra ante el período de barra cerrada más prolongado de la serie de datos. El último evento de apertura culminó en agosto de 2022 y desde entonces se ha mantenido cerrada hasta el presente (30/3/2024), alcanzando un total de 604 días. Previamente se habían registrado otros tres períodos prolongados de barra cerrada: 193 días (primavera 2016- otoño 2017), 255 días (primavera 2017- otoño 2018) y 229 días (primavera 2019 y otoño 2020) (Figura 5).

En general, cuando la barra permaneció cerrada muchos meses la salinidad disminuyó considerablemente, pudiendo permanecer condiciones de agua dulce u oligohalina entre 9 y 18 meses. Esto se observó claramente en los períodos ocurridos desde la primavera de 2017 al invierno de 2018 (0.7 a 1.5) y desde la primavera de 2022

hasta la fecha (0.3 a 6.3). Sin embargo, hubo ocasiones en que la salinidad permaneció muy elevada pese a estar la barra cerrada durante varios meses, lo cual se observó en el período entre primavera de 2020 y el verano de 2021 (22.0 a 28.1). Esto podría deberse a que luego de la descarga de agua e ingreso de agua marina a la laguna la barra se cerró, coincidiendo con el período estival, por lo que la salinidad pudo mantenerse o incluso aumentar debido a la evaporación, situación que se puede prolongar durante largos períodos si la lluvia no es suficiente. Incluso en dicho período se alcanzaron los valores de salinidad más elevados de todo el registro, mostrando que hay algunos intercambios con el océano muy efectivos y que promueven un importante intercambio de masas de agua.

Machado (2022) mostró, mediante modelación hidrodinámica, la relevancia del nivel del mar para el ingreso de agua marina a la Laguna de Rocha, pudiendo ser incluso más importante que la descarga de agua dulce de los ríos y mucho más importante que la intensidad y dirección de los vientos. Esto indicaría que el intercambio efectivo de agua con el mar depende también de la coincidencia de los períodos de barra abierta con eventos de subida del nivel del mar. Asimismo, se observó que las diferencias en salinidad entre la estación de monitoreo sur y norte son mínimas (Figura 3), indicando que la laguna tiene procesos de circulación y mezcla de agua muy importantes que determinan las características del sedimento, del agua y de las comunidades biológicas (Bergamino et al., 2018).

Fue muy notoria la relación inversa entre la salinidad y el fósforo total en el agua ($r = -0.72$, $p < 0.001$), donde en los períodos de mayor salinidad el PT fue muy bajo, incluso cercano al límite establecido por la normativa nacional, pero aumentó notoriamente en períodos prolongados de agua dulce (Figura 3). Una relación similar se observó con el nitrógeno total (Figura 3) y en segundo lugar con la clorofila a del agua (Figura 3), aunque con estos dos la relación fue menor y menos significativa (se omite la información estadística). Por su parte, la clorofila a en agua mostró cierta relación con la concentración de nutrientes, ya que si bien estuvo generalmente por debajo del límite guía establecido por la Mesa Técnica del Agua (Uruguay. Ministerio de Ambiente, Dirección Nacional de Medio Ambiente, 2017), los mayores valores coincidieron con valores más elevados de fósforo y/o nitrógeno, y en general en los meses más cálidos.

Comparación del estado de la Laguna Garzón previo a la proliferación de plantas con datos históricos

La comparación entre ambos períodos mostró que el rango de valores de temperatura, pH y conductividad fueron similares (Tabla 2), aunque la salinidad alcanzó valores máximos más elevados en el período 2015-2020. También en ese período la profundidad fue significativamente mayor, mientras que los sólidos suspendidos y la materia orgánica asociada mostraron valores significativamente menores a los datos del período 2002-2006, posiblemente debido a que la mayor profundidad del período actual habría atenuado el efecto del viento en la resuspensión de sedimentos.

Al comparar la concentración de las formas nitrogenadas del período 2015-2020 con los datos del 2002-2006, se observó un aumento importante y significativo de los valores medios en todos los casos (Tabla 2). El valor medio de concentración de amonio y nitrato se duplicó, mientras que para el nitrato aumentó casi 6 veces respecto del promedio histórico. Por último, el valor actual de nitrógeno total duplicó el valor histórico.

Además, se observó un aumento importante de los valores medios tanto de fósforo soluble (no significativo) como de fósforo total (significativo), el cual casi se duplicó en 2015-2020. La concentración media de clorofila *a* en agua en el período 2015-2020 superó el valor recomendado (Uruguay. Ministerio de Ambiente, Dirección Nacional de Medio Ambiente, 2017) en cuatro ocasiones (Figura 3), mientras que en el período histórico (2002-2006) el máximo valor registrado no superó la concentración de 7.9 µg/L.

TABLA 2. Comparación de los indicadores de calidad del agua entre el período de datos históricos (2002-2006) y el período actual (2015-2020). Se presenta la media y el desvío estándar (de). Se indica el valor del estadístico correspondiente y el p valor. ns: no significativo.

	2006-2006		2015-2020		Comparación
	Media	de	Meda	de	
Profundidad (m)	1	0.7	1.4	0.4	F = 15.9, p < 0.0001
Conductividad (ms/cm)	14.5	8.5	12.5	9.5	ns
Temperatura (°C)	20.3	5.2	19.3	5.4	ns
OD (mg/L)	9.2	1	8	1.2	Chi ² = 8.8, p < 0.0001
pH	7.6	0.6	7.9	0.4	F = 6.0, p < 0.01
SS (mg/L)	40.2	26.2	22.3	20	Chi ² = 8.8, p < 0.005
MOSS (mg/L)	10.5	7.2	5.4	4.8	Chi ² = 8.1, p < 0.05
PO ₄ (µgP/L)	21.9	36.9	27.7	26.8	ns
PT (µgP/L)	53.3	51.2	82.4	55.8	Chi ² = 0.0, p < 0.05
NO ₃ (µgN/L)	11.5	10.7	73.7	124.2	ns
NO ₂ (µgN/L)	0.8	0-6	1.9	2.1	Chi ² = 6.8, p < 0.01
NH ₄ (µgN/L)	19.3	36.8	38.1	28.1	Chi ² = 1050, p < 0.001
NT (µgN/L)	371.1	229	629.4	287.6	F = 12.3, p < 0.0001
Clo- <i>a</i> (µg/L)	4.6	2.5	3.4	4	ns
MO sed (mg/gPS)	29.5	23.7	71.6	35.3	F = 16.9, p < 0.0005
PT sed (µgP/gPS)	152.8	88.4	228.6	112.6	Chi ² = 6.1, p < 0.01
NT sed (µgN/gPS)	292	243.4	240.3	227.2	ns
Clo- <i>a</i> sed (µg/gPS)	21.9	12.8	24.2	22.2	ns

En el sedimento, el valor medio del contenido de materia orgánica se duplicó hacia el período 2015-2020 y el fósforo aumentó, pero en menor medida (Tabla 2). Por el contrario, el nitrógeno y la clorofila *a* en sedimento presentaron valores medios muy similares entre ambos períodos (Tabla 2), aunque la clorofila *a* presentó un valor extremo muy elevado en primavera de 2019 que no fue registrado previamente. Posiblemente, los mayores

valores de profundidad en el período 2015-2020 atenúen el crecimiento del fitobentos, impidiendo que alcancen valores más elevados pese al aumento de nutrientes.

Estos cambios en las concentraciones de nutrientes dan cuenta del proceso de eutrofización de la laguna, que seguramente generó las condiciones propicias para el crecimiento masivo de plantas sumergidas observado en la actualidad.

Recomendaciones para el manejo

La posibilidad de que pueda ocurrir una mortandad masiva de plantas por diferentes factores es una hipótesis plausible. Incluso, en marzo de 2024 la cobertura de plantas se redujo pese a que en febrero estaban vigorosas y cubrían gran parte de la laguna (observación *in situ*). Si bien la abundancia de plantas puede reducirse por varios factores endógenos, una de las causas más probables podría ser un aumento en la salinidad del agua una vez que se abre la barra arenosa. Si bien esta especie tolera salinidades intermedias (en torno de 10 a 16 según Rodríguez-Gallego et al., 2015), en esta laguna se reportaron valores más elevados luego de aperturas de la barra (Figura 3 y Uruguay. Ministerio de Ambiente, Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental, et al., 2021). Como consecuencia, existe el riesgo de que se genere una mortandad de plantas y que la carga de nutrientes de sus tejidos quede disponible para el fitoplancton potencialmente nocivo. Por su parte, las cianobacterias tienen baja tolerancia a la salinidad y a su variabilidad (Cabrera et al., 2013), por lo que es posible que el aumento de la salinidad que puede causar la mortandad de plantas podría también inhibir el desarrollo de estas microalgas.

Para que la laguna recupere un estado similar al registrado previo a la proliferación de plantas sumergidas es recomendable la remoción de la mayor cantidad posible de plantas. La forma de lograr esto a escala de toda la laguna, de bajo costo económico y basada en el conocimiento del funcionamiento natural del sistema, sería mediante el manejo de la barra, realizando la apertura artificial con la laguna al máximo nivel de agua posible. Esto podría remover, además de plantas, un gran volumen de agua y sedimentos enriquecidos en nutrientes. Una descarga de este tipo, si es sucedida de un evento de aumento del nivel del mar por tormentas, permitiría el ingreso de agua marina suficiente para elevar la salinidad en toda la laguna, y provocar la mortandad del remanente de plantas, a la vez que inhibir el crecimiento de cianobacterias.

En base a esto, es recomendable que se realice una apertura artificial de la barra en otoño, lo que podría generar un efecto positivo adicional, reduciendo el riesgo de proliferación de cianobacterias por la menor temperatura del agua. Asimismo, la primavera sería una estación muy propicia también, teniendo en cuenta que se encontraron que los incrementos en la salinidad registrados en primavera (estación del año en que los nutrientes disueltos tienden a aumentar) en las lagunas Garzón, Rocha y José Ignacio explicarían la ausencia de cianobacterias en estas lagunas en comparación con la Laguna de Castillos (Uruguay. Ministerio de Ambiente, Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental et al., 2021).

La remoción mecánica de plantas en sitios puntuales podría implementarse como una medida complementaria para mitigar afectaciones a ciertos usos de forma inmediata, por ejemplo, debajo del puente donde las plantas obstruyen en parte la circulación de

agua, o en sitios donde afectan algunos usos como el canal de navegación de pescadores, zonas para mejorar la estética paisajística, canchas de kitesurf, entre otros. Sin embargo, considerando la gran superficie afectada por las plantas, el costo de la remoción mecánica en toda la laguna es inabarcable, e incluso generaría otros impactos en el sistema por la circulación de maquinaria en el margen de la laguna. La remoción debe realizarse de manera de evitar que los nutrientes acumulados en las plantas vuelvan al sistema, por ejemplo, depositando las plantas alejadas del cuerpo de agua o evitando que se acumulen por varios días, ya que el lixiviado contiene gran parte del nitrógeno y fósforo reservado en los tejidos (Reddy et al. 1989, 1990). La biomasa removida contribuye a reducir progresivamente la carga de nutrientes del sistema y es un residuo con potencial de uso, para compostaje o como abono fresco (Tucker y DeBusk, 1983).

Debido a que la precipitación es un factor determinante de la dinámica de las lagunas costeras de Uruguay, las condiciones climáticas juegan un rol fundamental, así como las decisiones de manejo basadas en los pronósticos climáticos. El manejo de la barra debería considerar si existen condiciones de año lluvioso o seco (períodos Niño/Niña), que permitan alcanzar niveles de agua en la laguna elevados o mínimos suficientes para que se genere la conexión con el mar. Rodríguez-Gallego et al. (2023) muestran que en la Laguna Garzón los trimestres menos lluviosos tienen mayor nivel del agua, que además se mantiene elevado por más tiempo en comparación con los trimestres que registran mayor precipitación y eventos extremos de alta precipitación en poco tiempo. Esto indicaría que ante un escenario de poca precipitación es posible que el nivel del agua en la Laguna Garzón se mantenga relativamente elevado, pero no alcance los niveles esperados para proceder con la apertura artificial de la barra. Por lo tanto, en escenarios de menor precipitación y dado el aumento del estado trófico de la laguna antes descrito, es recomendable promover intervenciones excepcionales de apertura de la barra a niveles más bajos que el óptimo, que permitan generar un intercambio de agua con el mar y así reducir la biomasa de plantas por el aumento de la salinidad.

Esto está previsto en el protocolo de manejo de la barra propuesto por el SNAP, en proceso de revisión y aprobación por el Ministerio de Ambiente, donde el valor deseado para la apertura de la barra es de 1.9 m, pero a partir de 1.4 m -en caso de crecidas prolongadas y de problemas de calidad del agua- podría ser recomendable realizar aperturas artificiales especialmente ante pronósticos de ascenso del nivel del mar y mayor probabilidad de ingreso de agua marina al sistema. Igualmente, este manejo deberá ser monitoreado y evaluado rigurosamente. Es posible que para restablecer las condiciones previas al desarrollo de las plantas en la laguna se requieran varios ciclos de conexión entre la laguna y el mar, especialmente si no ocurren eventos extremos de lluvia que promuevan intercambios intensos con el océano.

CONCLUSIONES

La proliferación de plantas sumergidas en la Laguna Garzón es un síntoma del proceso de eutrofización. El crecimiento de plantas con una abundancia tan elevada puede deberse a varios factores como las condiciones de alta temperatura del agua, baja salinidad prolongada, profundidad y transparencia adecuadas. Sin embargo, uno de los

motivos principales es que existe en el sistema disponibilidad de nutrientes suficiente, principalmente en los sedimentos. En esta laguna se reportó un aumento sustancial de la concentración de nutrientes en agua y sedimento en comparación con datos de la década del 2000, posiblemente vinculado a la construcción del puente, a la intensificación de los usos del suelo en la cuenca y al régimen de manejo de la barra arenosa. Asimismo, las plantas en sí mismas constituyen un reservorio de nutrientes, ya que en sus tejidos acumulan gran cantidad de nitrógeno y fósforo, que por descomposición vuelven a estar disponibles en el sistema y pueden ser fácilmente utilizables por el fitoplancton. Esto podría favorecer el desarrollo de cianobacterias que fueron registradas formando una floración en verano de 2024, por primera vez, en zonas sin plantas acuáticas; las cuales tuvieron toxicidad positiva, aunque aceptable para aguas de recreación.

Asimismo, la proliferación de plantas causó cambios importantes en la comunidad bentónica, tanto en la composición como abundancia, efecto que tendrá que seguir siendo monitoreado para evaluar su alcance a largo plazo en la ecología trófica de la laguna. Los resultados de este trabajo y la evidencia de monitoreo y manejo de las lagunas costeras del país indican que el manejo artificial de la barra de la laguna puede contribuir a mitigar los efectos de la eutrofización si se realiza en condiciones que maximicen el intercambio de agua con el mar.

AGRADECIMIENTOS

A los guardaparques del área protegida Laguna Garzón y sus vecinos por la colaboración en la obtención de algunas muestras y datos de campo, así como sus aportes de conocimiento local.

REFERENCIAS

- Abreu, P. C.; Bergesch, M.; Proença, L. A.; Garcia, C. A. E. y Odebrecht, C., 2009. Short- and long-term chlorophyll a variability in the shallow microtidal Patos Lagoon estuary, Southern Brazil. En: *Estuaries and Coasts*, 33(2), pp. 554-569.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12237-009-9181-9>
- Alonso-Paz, E. y Bassagoda, M. J., 2006. Flora y vegetación de la costa platense y atlántica uruguaya. Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya. En: Menafrá, R.; Rodríguez-Gallego, L.; Scarabino, F. y Conde, D., eds. *Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya*. Montevideo: Vida Silvestre Uruguay. pp. 71-88.
- American Public Health Association, American Water Works Association y Water Environment Federation, 2012. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 22a ed. Washington: APHA. Standard Method 2540.
- Arocena, R., ed., 2016. *Principios y métodos de limnología*. Montevideo: Universidad de la República. Facultad de Ciencias.
- Bendschneider, K. y Robinson, R. J., 1952. A new spectrophotometric method for determination of nitrite in the sea water. En: *Journal of Marine Research* (11), pp. 87-96.

- Bergamino, L.; Rodríguez-Gallego, L.; Pérez-Parada, A.; Chialanza, M. R.; Amaral, V.; Perez, L.; Scarabino, F.; Lescano, C.; García-Sposito, C.; Costa, S.; Lane, C. S.; Tudurí, A.; Venturini, N. y García-Rodríguez, F., 2018. Autochthonous organic carbon contributions to the sedimentary pool: A multi-analytical approach in Laguna Garzón. En: *Organic Geochemistry*, (125), pp. 55–65.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2018.08.015>
- Bornette, G. y Puijalon, S., 2011. Response of aquatic plants to abiotic factors: a review. En: *Aquatic sciences*, (73), pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00027-010-0162-7>
- Cabrera, C.; Rodríguez-Gallego, L. y Kruk, C., 2013. Efecto de la salinidad y la concentración de nutrientes en las floraciones de cianobacterias de una laguna costera de Uruguay. En: Cirelli, A. F.; Carrera, A. P. y Volpedo, A., eds. *El agua en la producción agropecuaria. II Jornadas Interdisciplinarias Ciclo del Agua en Agroecosistemas*. Buenos Aires: Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua de la UBA. pp. 55-71.
- Carvalho, V.; Gonzalez, L.; Bueno, C.; Segura, C.; Bottezini, S. R.; Leonhardt, A.; Diniz, D.; Dentzien-Dias, P.; Perez, L.; Evangelista, H.; Licínio, M. V.; Inda, H.; Bergamino, L.; Weschenfelder, J.; Barboza, E. y Garcia-Rodriguez, F., 2024. Holocene organic matter composition in relation to relative sea level stands and associated morphometric changes of a lagoonal system. En: *Marine Geology*, (469), p. 107-248.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2024.107248>
- Carpenter, S. R., 2005. Eutrophication of aquatic ecosystems: bistability and soil phosphorus. En: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 102 (29), pp. 10002-10005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0503959102>
- Chorus, I. y Welker, M., eds., 2021. *Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management*. 2a ed. Boca Ratón: CRC PRESS y World Health Organization.
- Conde, D.; Rodríguez-Gallego, L.; de Álava, D.; Chreties, C.; Solari, S.; Verrastro, N.; Piñeiro, G.; Lagos, X.; Teixeira, L.; Vitancurt, J.; Caymaris, H.; Seijo, L. y Panario D., 2019. Ecological and social basis for the development of a sand barrier breaching model in Laguna de Rocha, Uruguay. En: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, pp. 300-316.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.02.003>
- Conde, D.; Rodríguez-Gallego, L. y Rodríguez-Graña, L., 2003. *Análisis conceptual de las interacciones abióticas y biológicas entre el océano y las lagunas de la costa atlántica de Uruguay*. PNUD/GEF/RLA/99/G31. Montevideo: UdelaR, Facultad de Ciencias, Sección Limnología. (FREPLATA-Ciencias, 8). ISBN 978-9974-95-147-1.
- Esteves, F. A.; Caliman, A.; Santagnelo, J. M.; Guariento, R. D.; Farjalla, V. F. y Bozeli, R. L., 2008. Neotropical coastal lagoons: an appraisal of their biodiversity, functioning, threats and conservation management. En: *Brazilian Journal of Biology*, 68 (4), pp. 967-981. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1519-69842008000500006>
- Hwang, S. J., 2020. Eutrophication and the ecological health risk. En: *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(17), pp. 1–6.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17176332>
- Heisler, J.; Glibert, P. M.; Burkholder, J. M.; Anderson, D. M.; Cochlan, W.; Dennison, W. C.; Dortch, Q.; Gobler, C. J.; Heil, C. A.; Humphries, E.; Lewitus, A.; Magnien, R.; Marshall, H. G.; Sellner, K.; Stockwell, D. A.; Stoecker, D. K. y Suddleson, M., 2008. Eutrophication

- and harmful algal blooms: a scientific consensus. En: *Harmful Algae*, 8(1), pp. 3-13.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hal.2008.08.006>
- Inda, H.; García-Rodríguez, F.; del Puerto, L.; Stutz, S.; Figueira, R. C. L.; de Lima Ferreira, P. A. y Mazzeo, N., 2016. Discriminating between natural and human-induced shifts in a shallow coastal lagoon: a multidisciplinary approach. En: *Anthropocene*, (16), pp. 1-15.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2016.09.003>
- Instituto Uruguayo de Meteorología, 2023. *Sequía meteorológica en Uruguay 2020-2023*. Informe Final. Montevideo: INUMET.
- James W.F., J.W. Barko y Butler, M.G., 2004. Shear stress and sediment resuspension in relation to submersed macrophyte biomass. En: *Hydrobiologia*, (515), pp. 181-191.
DOI: <https://doi.org/10.1023/B:HYDR.0000027329.67391.c6>
- Jespersen, A. M. y Christoffersen, K., 1987. Measurements of chlorophyll-a from phytoplankton using ethanol as extraction solvent. En: *Archivfur Hydrobiologie*, (109), pp. 445-454.
- Kjerfve, B., 1994. *Coastal lagoons processes*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers. (Elsevier Oceanography Series, 60).
- Koroleff, F., 1970. Direct determination of ammonia in natural waters as indophenol blue. Information on techniques and methods for seawater analysis. En: *Interlaboratory Reports*, (3), pp. 19-22.
- Kruk, C.; Rodríguez-Gallego, L.; Quintans, F.; Lacerot, G.; Scasso, F.; Mazzeo, N.; Meerhoff, M. y Paggi, J.C., 2006. Biodiversidad y calidad de agua de 18 pequeñas lagunas en la costa sureste de Uruguay. En: Menafra, R.; Rodríguez-Gallego, L.; Scarabino, F. y Conde, D., ed. *Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya*. Montevideo: Vida Silvestre Uruguay. pp. 599-610.
- Kruk, C.; Segura, A.; Nogueira, L.; Carballo, C.; Martínez de la Escalera, G.; Calliari, D.; Ferrari, G.; Simoens, M.; Cea, J.; Alcántara, I.; Vico, P.; Míguez, Di. y Piccini, C. 2015. Herramientas para el monitoreo y sistema de alerta de floraciones de cianobacterias nocivas: Río Uruguay y Río de la Plata. En: *INNOTEC*, (10), pp. 23-39.
DOI: <https://doi.org/10.26461/10.02>
- Lorenzen, C. J., 1967. Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equations. En: *Limnology and Oceanography* (12), pp. 343-346.
DOI: <https://doi.org/10.4319/lo.1967.12.2.0343>.
- Meerhoff, E.; Rodríguez-Gallego, L.; Giménez, L.; Muniz, P. y Conde, D., 2013. Spatial patterns of macrofaunal community structure in coastal lagoons of Uruguay. En: *Marine Ecology Progress Series*, (492), pp. 97-110.
DOI: <https://doi.org/10.3354/meps10472>
- Meerhoff, M.; Audet, J.; Davidson, T. A.; De Meester, L.; Hilt, S.; Kosten, S.; Zhengwen, L.; Mazzeo, N.; Paerl, H.; Scheffer, M. y Jeppesen, E. 2022. Feedback between climate change and eutrophication: revisiting the allied attack concept and how to strike back. En: *Inland Waters*, 12(2), pp. 187-204.
DOI: <https://doi.org/10.1080/20442041.2022.2029317>
- McAlpine, D. F.; Bishop, G.; Ceska, O.; Moody, M. L. y Ceska, A., 2007. Andean watermilfoil, *Myriophyllum quitense* (Haloragaceae), in the Saint John River estuary system, New Brunswick, Canada. En: *Rhodora*, 109(937), pp. 101-107.
DOI: [https://doi.org/10.3119/0035-4902\(2007\)109\[101:AWMQHI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.3119/0035-4902(2007)109[101:AWMQHI]2.0.CO;2)

- Machado, I., 2022. *Conectividad entre la Laguna de Rocha y la zona marina adyacente: implicancias para el reclutamiento de larvas de peces y decápodos* [En línea]. Montevideo: UdelaR, Facultad de Ciencias. (Tesis de doctorado). [Consulta: 6 de abril 2024]. Disponible en: <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/35333>
- Mackereth, F. J. H.; Heron, J. y Talling, J. F., 1978. Water analysis: some revised methods for limnologists. En: *The Freshwater Biological Association*, (36), pp. 1–120.
- Mazzeo, N.; Rodríguez-Gallego, L.; Kruk, C.; Meerhoff, M.; Gorga, J.; Lacerot, G.; Quintans, F.; Loureiro, M.; Larrea, D. y García-Rodríguez, F., 2003. Effects of *Egeria densa* Planch. beds on a shallow lake without piscivorous fish. En: *Hydrobiologia*, (506–509), pp. 591–602. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:HYDR.0000008571.40893.77>
- McGlathery, K. J., 2001. Macroalgal blooms contribute to the decline of seagrass in nutrient enriched coastal waters. En: *Journal of Phycology*, (37), pp. 453–456. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.2001.037004453.x>
- McSweeney, S. L.; Kennedy, D. M.; Rutherford, I. D. y Stout, J. C., 2017. Intermittently Closed/Open Lakes and Lagoons: Their global distribution and boundary conditions. En: *Geomorphology*, (292), pp. 142–152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.022>
- Moss, B.; Kosten, S.; Meerhoff, M.; Battarbee, R.; Jeppesen, E.; Mazzeo, N.; Havens, K.; Lacerot, G.; Liu, Z.; De Meester, L. y Paerl, H., 2011. Allied attack: climate change and eutrophication. En: *Inland Waters*, 1(2), pp.101–105. DOI: <https://doi.org/10.5268/IW-1.2.359>
- Müller, R. y Wiedemann, O., 1955. Die Bestimmung des Nitrat-Ions in Wasser. En: *Von Wasser*, (22), pp. 247–271.
- Murphy, J. y Riley, J. P., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. En: *Analytica Chimica Acta*, (27), pp. 31–36. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5)
- National Academy of Sciences, 1969. *Eutrophication: causes, consequences, correctives*. Washington D.C.: NAS.
- Nichols, D. S. y Keeney, D. R., 1976. Nitrogen nutrition of *Myriophyllum spicatum*: uptake and translocation of ¹⁵N by shoots and roots. En: *Freshwater Biology*, 6(2), pp. 145–154.
- Odebrecht, C.; Abreu, P. C.; Möller, O. O.; Niencheski, L. F.; Proença, L. A. y Torgan, L. C., 2005. Drought effects on pelagic properties in the shallow and turbid Patos Lagoon, Brazil. En: *Estuaries*, 28(5), pp. 675–685. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02732906>
- Odebrecht, C.; Abreu, P. C.; Bemvenuti, C. E.; Copertino, M.; Muelbert, J. H.; Vieira, J. P. y Seeliger, U., 2008. The Patos Lagoon Estuary. Biotic responses to natural and anthropogenic impacts in the last decades (1979 – 2008). En: *Coastal Lagoons; Critical Habitats of Environmental Change*, pp. 437–460.
- O’Neil, J. M.; Davis, T. W.; Burford, M. A. y Gobler, C. J., 2012. The rise of harmful cyanobacteria blooms: The potential roles of eutrophication and climate change. En: *Harmful Algae*, (14), pp. 313–334.
- Orchard, A. E., 1981. A revision of South American *Myriophyllum* (Haloragaceae), and its repercussions on some Australian and North American species. En: *Brunonia*, (4), pp. 27–65.

- Pérez-Ruzafa, A.; Campillo, S.; Fernández-Palacios, J. M.; García-Lacunza, A.; García-Oliva, M.; Ibáñez, H.; Navarro-Martínez, P. C.; Pérez-Marcos, M.; Pérez-Ruzafa, I. M.; Quispe-Becerra, J. I.; Sala-Mirete, A.; Sánchez, O. y Marcos, C., 2019. Long-term dynamic in nutrients, chlorophyll a, and water quality parameters in a coastal lagoon during a process of eutrophication for decades, a sudden break and a relatively rapid recovery. En: *Frontiers in Marine Science*, (6), p. 26.
DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00026>
- Quinlan, R.; Filazzola, A.; Mahdiyan, O.; Shuvo, A.; Blaggrave, K.; Ewins, C.; Moslenko, L.; Gray, D. K.; O'Reilly, C. M. y Sharma, S., 2020. Relationships of total phosphorus and chlorophyll in lakes worldwide. En: *Limnology and Oceanography*, (999), pp. 1-13.
DOI: <https://doi.org/10.1002/lno.11611>
- R Development Core Team, 2012. *R: A language and environment for statistical computing* [En línea]. Versión 2.15.1. Viena: R Foundation for Statistical Computing. [Consulta: 8 de marzo de 2022]. Disponible en: <http://www.project.org/index.html>
- Reddy, K. R.; Agami, M. y Tucker, J. C., 1998. Influence of nitrogen supply rates on growth and nutrient storage by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) plants. En: *Aquatic Botany*, (36), pp. 33-43.
- Reddy, K. R.; Agami, M. y Tucker, J. C., 1990. Influence of phosphorus on growth and nutrient storage by water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) plants. En: *Aquatic Botany*, (37), pp. 355-365.
- Rodríguez-Gallego, L.; Meerhoff, E.; Clemente, J. M. y Conde, D., 2010. Can ephemeral proliferations of submerged macrophytes influence zoobenthos and water quality in coastal lagoons? En: *Hydrobiologia*, (646), pp. 253-269.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-010-0185-z>
- Rodríguez-Gallego, L.; Masciadri, S. y Nin, M., 2012. Modern vegetation and pollen analogs in four southwestern atlantic coastal lagoons. En: *Estuaries and Coasts*, (35), pp. 785-798. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12237-012-9476-0>
- Rodríguez-Gallego, L.; Sabaj, V.; Masciadri, S.; Kruk, C.; Arocena, R. y Conde, D., 2015. Salinity as a major driver for submerged aquatic vegetation in coastal lagoons: a multi-year analysis in the subtropical Laguna de Rocha. En: *Estuaries and Coasts*, (38), pp. 451-465. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12237-014-9842-1>
- Rodríguez-Gallego, L.; Achkar, M.; Defeo, O.; Vidal, L.; Meerhoff E y Conde, D., 2017. Effects of land use changes on eutrophication indicators in five coastal lagoons of the Southwestern Atlantic Ocean. En: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, (188), pp. 116-126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.02.010>
- Rodríguez-Gallego, L.; Gallego, F.; Mai, P.; Chreties, Ch.; Pollero, A.; Morales, S. y Narbondo, S., 2023. Caracterización Ecológica de la planicie de inundación de la Laguna Garzón. En: Rodríguez-Gallego, L. y Bergamino, L., eds. *Producto 3 (final) del Convenio de cooperación técnica y científica para la ejecución de actividades de capacitación e investigación*. Rocha: CURE-UDELAR. pp. 83.
- Santana, O. y Fabiano, G., 1999. *Medidas y mecanismos de administración de los recursos de las lagunas costeras del Litoral Atlántico del Uruguay*. Montevideo: INAPE-PNUD.
- Scheffer, M.; Carpenter, S.; Foley, J. A.; Folke, C. y Walker, B., 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. En: *Nature*, 413(6856), pp. 591-596.

- Schmitt, M. R. y Adams M. S., 1981. Dependence of rates of apparent photosynthesis on tissue phosphorus concentrations in *Myriophyllum spicatum* L. En: *Aquat. Bot.*, (11), pp. 379-387. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(81\)90071-1](https://doi.org/10.1016/0304-3770(81)90071-1)
- Segura, A. M.; Piccini, C.; Nogueira, L.; Alcántara, I.; Calliari, D. y Kruk, C., 2017. Increased sampled volume improves *Microcystis aeruginosa* complex (MAC) colonies detection and prediction using Random Forests. En: *Ecological Indicators*, (79), pp. 347-354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.04.047>
- Tucker, C. S. y DeBusk, T. A., 1983. Seasonal variation in the nitrate content of water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms). En: *Aquatic Botany*, (15), pp. 419-422.
- Uruguay. Decreto 341/014, de 21 de noviembre de 2014. *Diario Oficial* [En línea], 21 de noviembre de 2014, [Consulta: 27 de abril de 2024]. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/341-2014>.
- Uruguay. Decreto 253/979, de 9 de mayo de 1979. *Diario Oficial* [En línea], 31 de mayo de 1979, [Consulta: 27 de abril de 2024]. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/253-1979>.
- Uruguay. Ministerio de Ambiente, Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental, 2020. *Protocolo de monitoreo visual* [En línea]. Montevideo: Ministerio de Ambiente. [Consulta: 27 de abril de 2024]. Disponible en: https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/DCA-PROTOCOLO-MONITOREO-VISUAL-CIANOBIOTERIAS-PLAYAS_2020.pdf
- Uruguay. Ministerio de Ambiente, Dirección Nacional de Medio Ambiente, 2017. Mesa técnica del agua. *Informe de asesoría. Establecimiento de niveles guía de indicadores de estado trófico en cuerpos de agua superficiales*. Montevideo: DINAMA. (Documento N° 1).
- Uruguay. Ministerio de Ambiente, Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental, Dirección Nacional de Recursos Acuáticos; Obras Sanitarias del Estado; Intendencia Departamental de Rocha; Centro Universitario Regional Este, 2021. *Evaluación Ambiental de las Lagunas Costeras (José Ignacio, Garzón, Rocha y Castillos) y de sus principales tributarios (2017 - 2020)*. Montevideo: Ministerio de Ambiente.
- United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2014. *Soil survey field and laboratory method manual. Soil survey investigations report No 51 Version 2.0*. Washington: USDA.
- Valderrama, J. C., 1981. The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters. En: *Marine Chemistry*, (10), pp. 109-122. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0304-4203\(81\)90027-X](http://dx.doi.org/10.1016/0304-4203(81)90027-X)
- Vanderstukken, M.; Mazzeo, N.; Van Colen, W.; Declerck, S. A. y Muylaert, K., 2011. Biological control of phytoplankton by the subtropical submerged macrophytes *Egeria densa* and *Potamogeton illinoensis*: a mesocosm study. En: *Freshwater Biology*, 56(9), pp. 1837-1849. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2011.02624.x>
- Vianna Boggiani, M., 2012. *Efecto de las macrófitas sumergidas Myriophyllum quitense y Potamogeton illinoensis en la estructura de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos en un reservorio somero. Laguna del Diario, Maldonado-Uruguay*. Montevideo: UdelaR, Facultad de Ciencias. [Consulta: 6 de abril de 2024]. Disponible en: <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/1503>
- Zar, J. H., 1999. *Biostatistical analysis*. New Jersey: Prentice Hall.

Zweig, C. L.; Burgess, M. A.; Percival, H. F. y Kitchens, W. M., 2015. Use of Unmanned aircraft to delineate fine-scale wetland vegetation communities. En: *Wetlands*, (35), pp. 303-309. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13157-014-0612-4>

Formulación de croquetas congeladas: hacia un producto más saludable

Formulation of frozen croquettes:
towards a healthier product

Formulação de croquetes congelados:
rumo a um produto mais saudável

 **PATRICIA ARCIA** (1,2)

 **FLORENCIA GARCÍA** (1)

 **LARA PEREIRA** (1)

 **MILAGROS TORRENDELL** (1)

 **ANA CURUTCHET** (1,2)

(1) Grupo de Ciencias del Consumidor, Departamento de Ingeniería, Facultad de Ingeniería y Tecnologías, Universidad Católica del Uruguay, Montevideo, Uruguay.

(2) Latitud - Fundación LATU, Montevideo, Uruguay.

RECIBIDO: 21/8/2024 → APROBADO: 5/11/2024  parcia@latitud.org.uy

RESUMEN

Este trabajo buscó formular croquetas de papa prefritas congeladas, reducidas en grasas con un perfil nutricional más saludable, comparando sus características con productos del mercado. Se formuló el relleno y el rebozado buscando disminuir la absorción de aceite, utilizando para ello goma xantana en el relleno (0,15 %, 0,25 %, 0,35 %) y en el rebozado (0,15 %, 0,50 %, 0,85 %). Las croquetas se prepararon prefriendo a 180 °C por 50 segundos y luego se congelaron. La cocción de la croqueta se terminó friendo a 180 °C por 3 minutos. Las croquetas formuladas fueron analizadas y comparadas con 2 productos comerciales, según el contenido de grasa, la textura y el color instrumentales. La reducción de grasa resultó significativa, con valores inferiores a las del mercado. La muestra con menor porcentaje de grasa (1,8 %) contenía 0,35 % en relleno y 0,50 % en rebozado de goma xantana. Por otro lado, el mayor porcentaje de absorción de grasas (9,4 %) se obtuvo de la muestra con una concentración de xantana de 0,15 % en el rebozado y 0,25 % en el relleno. Por lo que el porcentaje máximo de reducción de grasa fue de 81 %. En cuanto a la textura y el color instrumentales, las croquetas experimentales no presentaron diferencias significativas entre ellas. Sí mostraron diferencias con los productos del mercado. Finalmente, la croqueta resultante con menor contenido de grasa fue comparada sensorialmente con las croquetas comerciales. La formulación elegida (0,35 % de goma xantana en el interior y 0,50 % en el recubrimiento), tuvo una aceptabilidad similar a uno de los productos comerciales, y significativamente mayor

al otro, mostrando que existe una oportunidad para este producto en el mercado. Por tanto, es posible reducir de forma significativa la absorción de aceite de croquetas fritas modificando solo su formulación y así obtener un producto con menor contenido de grasas que sus homólogas del mercado.

Palabras clave: fritura, grasa, consumidores, textura, color.

ABSTRACT

This work seeks to formulate low-fat frozen pre-fried potato croquettes with a healthy nutritional profile, comparing their characteristics with market products. The filling and batter were formulated seeking to reduce the absorption of oil, using xanthan gum in the filling (0.15 %, 0.25 %, 0.35 %) and in the batter (0.15 %, 0.50 %, 0.85 %). The croquettes were prepared by pre-frying at 180 °C for 50 seconds, then frozen. The cooking of the croquette was finished by frying at 180 °C for 3 minutes. The formulated croquettes were analyzed and compared to 2 commercial products, based on fat content, instrumental texture, and instrumental color. It was observed that the fat reduction was significant, with values lower than those of the market. The sample with the lowest percentage of fat (1.8 %) contained 0.35 % filling and 0.50 % xanthan gum coating. On the other hand, the highest percentage of fat absorption (9.4 %) was obtained from the sample with a xanthan concentration of 0.15 % in the batter and 0.25 % in the filling. The maximum percentage of fat reduction was 81 %. Concerning instrumental texture and color, no significant differences were observed among the experimental croquettes. However, they did differ from the commercial products. Finally, the croquette with the lowest fat content was subjected to sensory comparison against the commercial croquettes. The selected formulation (0.35 % xanthan gum in the core -0.50 % xanthan gum in the coating) showed similar acceptability to one of the commercial products and significantly higher acceptability compared to the other, indicating a potential market for this product. So, it was possible to significantly reduce the absorption of oil from fried croquettes by only modifying its formulation and thus obtain a product with a lower fat content than its market counterparts and with a higher acceptability by consumer.

Keywords: frying, fat, consumers, texture, color.

RESUMO

Este trabalho buscou formular croquetes de batata pré-frita congelados com baixo teor de gordura e perfil nutricional saudável, comparando suas características com produtos de mercado. O recheio e a massa são formulados buscando reduzir a absorção de óleo, utilizando goma xantana no recheio (0,15 %, 0,25 %, 0,35 %) e na massa (0,15 %, 0,50 %, 0,85 %). Os croquetes são preparados pré-fritos a 180 °C durante 50 minutos e depois congelados. A cozedura do croquete termina fritando-o a 180 °C durante 3 minutos. Croquetas formuladas foram analisadas e comparadas com dois produtos comerciais com base no teor de gordura, textura e cor instrumentais. A redução de gordura foi significativa, com valores inferiores aos do mercado. A amostra com menor percentual

de gordura (1,8 %) contém 0,35 % de recheio e 0,50 % de cobertura de goma xantana. Por outro lado, o maior percentual de absorção de gordura (9,4 %) foi obtido na amostra com concentração de xantana de 0,15 % na massa e 0,25 % no recheio. Portanto, o percentual máximo de redução de gordura foi de 81 %. A textura e a cor instrumental das croquetas experimentais não diferiram significativamente entre si. Entretanto, diferiram dos produtos comerciais. A croqueta com menor teor de gordura foi comparada sensorialmente a amostras comerciais. A formulação escolhida (0,35 % de goma xantana no miolo, 0,50 % no revestimento) foi tão aceitável quanto um produto comercial e significativamente melhor que o outro, sugerindo uma oportunidade de mercado. É possível reduzir significativamente a absorção de óleo dos croquetes fritos modificando apenas a sua formulação e assim obter um produto com menor teor de gordura do que os seus congêneres no mercado.

Palavras-chave: fritura, gordura, consumidores, textura, cor.

INTRODUCCIÓN

Mundialmente, la fritura es uno de los métodos de cocción con mayor aceptabilidad por parte de los consumidores, no solo por sus características sensoriales sino también por la rapidez de las preparaciones, lo cual se ve reflejado en la gran variedad de productos fritos y prefritos que ofrece el mercado (Montes et al., 2016). Las croquetas son uno de los fritos más populares en la cocina global; si bien son originarias de Francia, varían de acuerdo con las tendencias gastronómicas de cada país. Se incluyen dentro del grupo de comidas listas para comer, las cuales han aumentado exponencialmente su consumo en los últimos años (Soto et al., 2015).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, y la Organización Mundial de la Salud (FAO y OMS, 2002) indican que incluir en la dieta un alto contenido de alimentos fritos es un factor de riesgo para la salud. Esto se debe a la alta densidad energética proporcionada por las grasas y la formación de compuestos tóxicos como la acrilamida, que se ha relacionado con el desarrollo de algunos tipos de cánceres.

La fritura es un proceso complejo de transferencia de masa, en el cual los alimentos pierden agua y absorben grasa. El proceso ocurre al sumergir el alimento en aceite a altas temperaturas (mayor al punto de ebullición del agua), lo cual produce una cocción rápida y uniforme (Montes et al., 2016). Al mismo tiempo, se ven involucradas reacciones químicas de oxidación, polimerización e hidrogenación. Las altas temperaturas de la fritura atmosférica generan un flavor característico llamado sabor de reacción que otorga a los alimentos sabores y aromas agradables (Mestdagh et al., 2008).

Actualmente, los consumidores demandan alimentos bajos en grasas sin sacrificar las propiedades sensoriales; por eso se busca la reducción de la absorción de aceite en productos empanados. Dicho requisito puede lograrse mediante un cambio en la formulación con la adición de hidrocoloides o con aplicaciones tecnológicas sobre el producto como la fritura a presiones debajo de la atmosférica (Soto et al., 2015). A su vez, la adición de harinas de arroz y tratamientos prefritura como secado por aire caliente han mostrado reducir la absorción de aceite en el producto final (Montes et al., 2016). Por otro lado, Sharma et al. (2006) estudiaron distintos aceites de fritura y determinaron que una

combinación de aceite de arroz (60 %) y aceite de girasol (40 %) proporcionan resultados satisfactorios en cuanto a la mejora de la termoestabilidad, la estabilidad oxidativa y los beneficios nutricionales. Dicha combinación probó ser más estable en comparación con otras proporciones de estos aceites en cuanto a índice de acidez, índice de yodo y los ácidos palmítico, esteárico y linoleico no presentaron variaciones significativas.

Retomando lo establecido previamente, las formulaciones para la obtención de un producto con bajo contenido de aceite pueden lograrse con el agregado de hidrocoloides. Se destaca la utilización de hidrocoloides en el revestimiento, en particular los basados en polímeros hidrófilos ya que son una gran barrera para las grasas y los aceites. Según investigaciones realizadas por Balasubramaniam et al. (1997), al freír trozos de comida recubiertos, la película dificulta la absorción del aceite, mejorando sus cualidades nutricionales y reduciendo el contenido de grasa y calorías del producto final. Estudios consultados recomiendan la utilización de goma xantana al compararse con goma guar y HPMC (Soto et al., 2015). Respecto al uso de hidrocoloides dentro del relleno, no se encontraron a la fecha trabajos publicados que hagan referencia a sus efectos. Debido a la capacidad de la goma xantana de absorber entre un 8 y 15 % de agua a 23 °C (Lin, 2013) se considera interesante evaluar dicho efecto en la masa de productos para freír.

El objetivo general de la presente investigación fue formular croquetas de papa prefritas congeladas reducidas en grasas, con un perfil nutricional saludable, aceptadas sensorialmente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Elaboración de las croquetas

Los materiales para la preparación de las croquetas, comprados en el mercado local, fueron los siguientes: puré de papa instantáneo (Gourmet), harina de arroz integral (Saman), sal fina (Sal Sek), pimienta blanca (La Molienda), condimento verde (La Molienda), cúrcuma (Prana) y goma xantana (Biotec). Para el recubrimiento (rebozado) y relleno se usaron distintas proporciones de goma xantana (Tabla 1). En cuanto al rebozado, según lo obtenido en ensayos preliminares, se empleó una proporción de 50 % de harina de arroz integral y 50 % de pan rallado (El Trigal), sal fina y cúrcuma.

Para el armado de las croquetas, se pesaron 30 g del relleno y se armaron formas cilíndricas de 6 cm de largo y 3 cm de diámetro aproximadamente. A continuación, para la etapa del empanado, el relleno se pasó primero por el coating y seguidamente se recubrió con el rebozado. Posteriormente se prefritaron las croquetas.

TABLA 1. Muestras variando el porcentaje de goma xantana en relleno y recubrimiento.

Goma xantana en el recubrimiento (%)			
Goma xantana en el relleno (%)	0,15	0,50	0,85
0	M1	M2	M3
0,15	M4	M5	M6
0,25	M7	M8	M9
0,35	M10	M11	M12

Las muestras (Tabla 1) se prefrieron a 180 °C durante 50 segundos, en freidora eléctrica (capacidad 3 Litros, Visioneer) y el líquido de fritura estuvo compuesto por aceite de arroz (Saman) y aceite de girasol alto oleico (Óptimo), en una relación 60:40 (Sharma et al., 2006).

Por tanda, se introdujeron 2 unidades para mantener la temperatura del aceite y que la cocción sea uniforme. Se dejó escurrir el exceso de aceite después de sacarlas de la freidora durante 3 minutos. Se congelaron a -18 °C, y se mantuvieron por 24 hs, y al momento de finalizar la cocción se frieron en las mismas condiciones, pero por un tiempo de 3 minutos.

De la misma forma, se fritaron croquetas prefritas congeladas de dos marcas líderes del mercado denominadas Comercial 1 y Comercial 2 bajo las mismas condiciones.

Contenido de grasa

Se determinó el contenido de grasa por el método de Soxhlet, con éter de petróleo, sobre la muestra tal cual, con una extracción de 60 minutos, según lo descrito en AOAC International (2007), para las muestras definidas de la Tabla 1 y las dos muestras del mercado. El análisis se realizó por triplicado.

Características físicas

Se analizó la textura y el color de todas las muestras definidas de la Tabla 1 y las dos muestras del mercado.

Determinación de textura

Se estudió la textura de las 12 muestras experimentales (Tabla 1) y las 2 del mercado (Comercial 1 y Comercial 2). Todas las croquetas se frieron en condiciones de frito tradicional (180 °C durante 3 minutos) y se dejaron enfriar una hora para llegar a temperatura ambiente. Para dicho análisis, cada croqueta se colocó entera de forma horizontal.

El análisis se determinó por una prueba de punción de solo una compresión con el fin de medir la fuerza necesaria para penetrar la croqueta. Se llevó a cabo utilizando el texturómetro TA.XT Plus con una sonda de acero inoxidable cilíndrica de 3 mm de diámetro y 25 mm de altura. El equipo se calibró con un peso de 2 kg y la velocidad de

prueba fue de 100 mm/min con una profundidad objetiva del 50 % de la muestra. El análisis de textura se realizó en 10 unidades por muestra experimental (Tan y Mittal, 2006).

Determinación de color

El color se evaluó por duplicado mediante el uso del espectrofotómetro de color Hunter LabScan XE previamente calibrado. Los factores evaluados fueron: L* (negro-blanco), a* (verde-rojo) y b* (azul-amarillo).

Evaluación sensorial

Las muestras experimentales junto con las dos croquetas del mercado fueron sometidas a evaluación sensorial por consumidores. En la prueba participaron 102 individuos, de los cuales el 53 % fueron hombres y el 47 % mujeres, con edades entre 15 y 79 años.

Todas las muestras se cocinaron de la misma forma, las croquetas fueron freídas en aceite a 180 °C por 3 minutos y luego colocadas sobre una rejilla para escurrirse. Se sirvieron en mitades en platos de plástico codificado utilizando números aleatorios de tres dígitos y se presentaron a los consumidores en orden aleatorio. Participaron consumidores habituales o esporádicos de croquetas, funcionarios de la Universidad Católica del Uruguay y de Latitud – Fundación LATU.

Durante la evaluación, se les pidió a los consumidores que indicaran aceptabilidad e intención de compra de los productos, sin recibir ninguna información sobre ellos. La aceptabilidad general del producto se evaluó con una escala hedónica de nueve puntos, que va del 1 (“Me disgusta muchísimo”) al 9 (“Me gusta muchísimo”). Para evaluar la crocancia se utilizó la escala de adecuación JAR (Just About Right), representada por una escala estructurada de siete puntos, siendo 1: “Poco crocante”, 4: “Lo justo” y 7: “Muy crocante”.

Luego se le presentaron al consumidor 18 descriptores sensoriales para que marque según la consigna “check-all-that-applies” (CATA), con el fin de obtener las principales características que considera de la muestra. Finalmente se valoró la intención de compra, utilizando una escala hedónica de siete puntos, que va del 1 (“Definitivamente no lo compraría”) a 7 (“Definitivamente lo compraría”).

Análisis estadístico

Los resultados se expresan como la media \pm la desviación estándar. Se realizó un ANOVA de dos factores (contenido de goma xantana en el relleno y contenido de goma xantana en el recubrimiento) sobre los datos del contenido de grasa, color y textura instrumentales. Se realizó un ANOVA de un factor (muestras) sobre los datos de aceptabilidad e intención de compra. Para evaluar la diferencia significativa entre valores se empleó la prueba Tukey y un p-valor de 0,05. La pregunta JAR de crocancia (“Poco crocante”, “Lo justo” y “Muy crocante”), se evaluó mediante cálculo de frecuencias. Se cuantificó la frecuencia de los términos CATA y para determinar las diferencias significativas entre las muestras se utilizó la prueba Q de Cochran. Sobre los términos de CATA y las muestras comerciales y la elegida para la evaluación sensorial se realizó un análisis de componentes principales (PCA). Se utilizó el software XLSTAT (Lumivero, 2024).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de la goma xantana en relleno y rebozado sobre la absorción de grasa

Se varió el contenido de goma xantana tanto en el recubrimiento (rebozado) como en el relleno para estudiar la absorción de grasas y se analizaron los datos con el fin de comparar las croquetas elaboradas con las que ofrece el mercado: Comercial 1 y Comercial 2. Los resultados obtenidos se expresan en la Tabla 2.

TABLA 2. Resultado de grasas totales en %.

Goma xantana en el relleno (%)	Goma xantana en el recubrimiento (%)		
	0,15	0,50	0,85
0	6,71 ± 0,22 ^d	8,18 ± 0,23 ^{a,b,c,d}	8,52 ± 0,00 ^{a,b,c,d}
0,15	7,64 ± 0,45 ^{b,c,d}	7,09 ± 0,13 ^{c,d}	9,04 ± 0,14 ^{a,b,c}
0,25	9,44 ± 0,03 ^a	8,30 ± 0,06 ^{a,b,c,d}	2,69 ± 0,09 ^f
0,35	8,80 ± 0,24 ^{a,b,c}	1,80 ± 0,29 ^f	2,03 ± 0,21 ^f
Comercial 1	7,81 ± 0,04 ^{a,b,c,d}		
Comercial 2	4,82 ± 0,41 ^e		

Superíndices iguales muestran que no hay diferencia significativa entre los valores promedios ($p = 0,05\%$).

Los datos expuestos en la Tabla 2 muestran que la combinación de alta concentración de goma xantana en el relleno y alta concentración de goma xantana en el recubrimiento tuvo un impacto positivo en la reducción del contenido de grasa en la croqueta. Concretamente, para valores de 0,85 % de goma xantana en el recubrimiento, el contenido de grasa en la croqueta disminuye cuando contiene más de 0,25 % de goma xantana en el relleno. Pero, al bajar el contenido de goma xantana en el recubrimiento a valores de 0,50 %, es necesario que el relleno tenga valores altos de xantana (0,35 %). Por debajo de este valor de goma xantana en el relleno, la absorción de grasa aumenta. Esta sería la condición del ensayo M8, que contiene 0,50 % xantana en recubrimiento y 0,25 % xantana en el relleno.

Esta combinación no sería suficiente para lograr una disminución significativa del contenido de grasa, condición que es alcanzada para mayores niveles de xantana, tanto en el recubrimiento como en el relleno. Con valores de goma xantana en recubrimiento y relleno por encima de los estipulados para la muestra M8, se lograron croquetas con reducción del contenido de grasa. Así, se observó que las muestras que presentan un menor contenido de grasas significativo son: M9 (0,25 % de goma xantana en el relleno -0,85 % de goma xantana en el recubrimiento), M11 (0,35 % de goma xantana en el relleno -0,50 % de goma xantana en el recubrimiento) y M12 (0,35 % de goma xantana en el relleno -0,85 % de goma xantana en el recubrimiento).

Al comparar el contenido de grasa del resto de las muestras experimentales con la Comercial 1, se observó que no presentan diferencias significativas ($p = 0,05 \%$). Sin embargo, la muestra Comercial 2 fue significativamente distinta a todas las muestras, tanto las desarrolladas en la investigación como la Comercial 1 ($p = 0,05 \%$).

A continuación, se presentan los gráficos correspondientes al análisis de varianza de dos factores: el efecto de la concentración de goma xantana en el recubrimiento y en el relleno respectivamente, el cual fue significativo ($F = 71,24$ y $p = 0,0001 \%$) (Figuras 1 y 2 respectivamente).

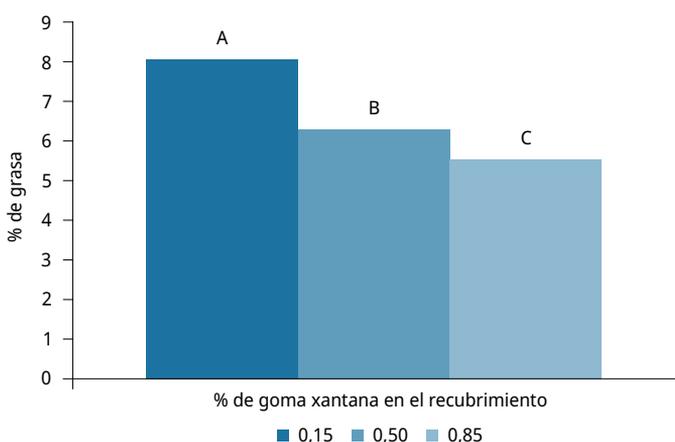


FIGURA 1. ANOVA de dos factores: efecto del recubrimiento en la absorción de grasa. Letras iguales muestran que no hay diferencia significativa entre los valores promedios ($p = 0,05 \%$).

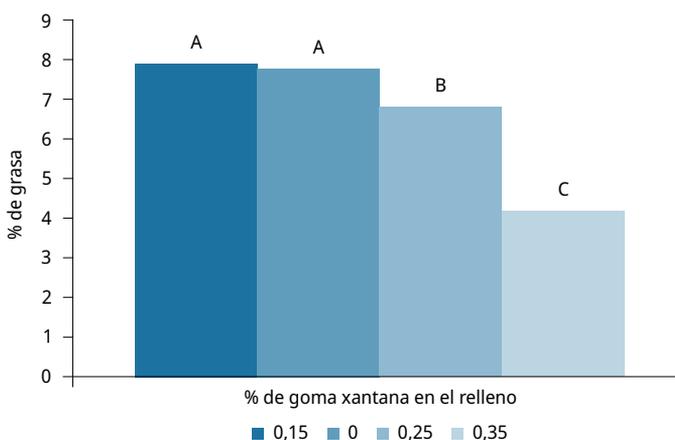


FIGURA 2. ANOVA de dos factores: efecto del relleno en la absorción de grasa. Letras iguales muestran que no hay diferencia significativa entre los valores promedios ($p = 0,05 \%$).

Los resultados arrojan que las diferentes cantidades de goma xantana en el recubrimiento tienen diferencias significativas ($p = 0,05 \%$), siendo la de 0,85 % la que presenta menor valor

absoluto de absorción de grasas. Este hecho era de esperarse ya que un estudio comparativo sobre la efectividad de las gomas en la reducción de la absorción de aceite en empanadillas demostró que los mejores resultados (reducción mayor al 20 %) se obtuvieron cuando se utilizó goma xantana (Sakhale et al., 2011). Investigaciones posteriores también respaldaron el uso de este hidrocoloide con el fin de reducir la absorción de grasas en chips de bananas, logrando un descenso del 40 % respecto a la muestra de control (Norizzah et al., 2016).

Por otro lado, en cuanto a la variación del hidrocoloide en el relleno, se dedujo que no incluirlo en la masa o incluirlo al 0,15 % no presenta diferencias significativas ($p = 0,05$ %). Mientras tanto, 0,25 % y 0,35 % de goma en el interior sí muestra diferencias significativas entre estas y las descritas anteriormente ($p = 0,05$ %). No se ha encontrado bibliografía que respalde el uso de hidrocoloides en el interior de alimentos rebozados con el fin de obtener una reducción en la absorción de aceite de fritura. Por lo tanto, se puede concluir que la variación de goma xantana en el interior, específicamente al 0,35 %, reduce de manera significativa la absorción de grasas y se obtiene para esa concentración, el mínimo.

Características físicas

Determinación de textura

Se analizó la textura de las croquetas experimentales y las comerciales con el propósito de identificar si la goma xantana y la harina de arroz integral tienen un efecto sobre ella. Dichos resultados se observan en la Tabla 3.

TABLA 3. Fuerza necesaria para penetrar la costra (Newtons).

Muestra	Goma xantana relleno (%)	Goma xantana recubrimiento (%)	Fuerza (N)
M1	-	0,15	0,52 ± 0,13 ^a
M2	-	0,50	0,51 ± 0,20 ^a
M3	-	0,85	0,50 ± 0,12 ^a
M4	0,15	0,15	0,55 ± 0,11 ^a
M5	0,15	0,50	0,53 ± 0,10 ^a
M6	0,15	0,85	0,59 ± 0,12 ^a
M7	0,25	0,15	0,60 ± 0,16 ^a
M8	0,25	0,50	0,58 ± 0,14 ^a
M9	0,25	0,85	0,68 ± 0,13 ^a
M10	0,35	0,15	0,64 ± 0,11 ^a
M11	0,35	0,50	0,53 ± 0,10 ^a
M12	0,35	0,85	0,58 ± 0,10 ^a
Comercial 1	-	-	0,93 ± 0,30 ^b
Comercial 2	-	-	1,42 ± 0,11 ^c

Superíndices iguales muestran que no hay diferencia significativa entre los valores promedios ($p = 0,05$ %).

Los valores obtenidos del análisis de textura muestran que no hay diferencias significativas entre las muestras de croquetas experimentales ($p = 0,05\%$), lo cual indica que la variación de goma xantana en el exterior de la croqueta y en el interior no varía de forma significativa la fuerza necesaria para penetrar la croqueta. Sin embargo, sí se observan diferencias entre las croquetas experimentales y las del mercado, siendo la muestra Comercial 2 la que presenta mayor fuerza necesaria para penetrar la muestra.

Estos resultados son concordantes con los obtenidos por Kuntz (1995), que demuestran que la adición de goma xantana a concentraciones mayores a 0,2 % aporta una textura menos crujiente en alimentos rebozados. Por otro lado, Chen, Kang y Chen (2008) incorporaron HPMC al 1 % en *nuggets* de pescado en el recubrimiento y se obtuvo una textura menos crujiente al compararla con muestras sin dicho hidrocoloide. Esto se atribuyó a que las moléculas de agua en la corteza fueron captadas por el HPMC, resultando en un recubrimiento menos crujiente y una elasticidad más elevada.

Otra razón por la cual las croquetas experimentales resultaron en menor fuerza de penetración fue por el agregado de harina de arroz en el rebozado (menor contenido de gluten). Panduro Castañeda (2015) comparó *nuggets* de pollo rebozados con un pan rallado 100 % de harina de trigo con el mismo producto, pero sustituyendo dicho rebozado por harina de quinoa, observando que la muestra sin harina de quinoa fue la que presentó una mayor fuerza. El alto contenido de gluten forma una película que provoca un empanizado con mayor firmeza.

Determinación de color

Se analizó, adicionalmente, si las croquetas con distintas concentraciones de goma xantana y la utilización de harina de arroz integral producen un cambio en su color al ser comparadas con las muestras del mercado y entre ellas mismas (Tabla 4).

TABLA 4. Análisis de color a partir de L*, a* y b*.

Muestra	Goma xantana relleno (%)	Goma xantana recubrimiento (%)	L*	a*	b*
M1	-	0,15	55,19 ± 1,30 ^{b,c,d}	6,44 ± 0,64 ^{a,b,c}	34,88 ± 0,89 ^{b,c,d}
M2	-	0,50	54,82 ± 1,57 ^{b,c,d}	6,57 ± 1,27 ^{b,c}	34,42 ± 1,06 ^{a,b,c,d}
M3	-	0,85	53,72 ± 2,15 ^{b,c,d}	6,46 ± 1,72 ^{a,b,c}	36,62 ± 3,41 ^d
M4	0,15	0,15	53,48 ± 1,57 ^b	7,80 ± 0,50 ^c	34,96 ± 1,01 ^{b,c,d}
M5	0,15	0,50	54,47 ± 0,34 ^{b,c,d}	6,35 ± 1,89 ^{a,b,c}	34,04 ± 2,83 ^{a,b,c,d}
M6	0,15	0,85	53,92 ± 0,41 ^b	7,53 ± 0,65 ^c	33,89 ± 1,70 ^{a,b,c,d}
M7	0,25	0,15	56,58 ± 0,84 ^d	4,95 ± 0,89 ^{a,b}	32,27 ± 1,29 ^a
M8	0,25	0,50	55,50 ± 0,67 ^{b,c,d}	7,62 ± 0,73 ^c	36,28 ± 0,34 ^{c,d}
M9	0,25	0,85	54,85 ± 0,51 ^{b,c,d}	6,65 ± 1,71 ^{b,c}	32,40 ± 1,43 ^{a,b}
M10	0,35	0,15	56,32 ± 1,88 ^{c,d}	5,06 ± 0,39 ^a	33,02 ± 1,13 ^{a,b,c}
M11	0,35	0,50	55,22 ± 0,94 ^{b,c,d}	5,27 ± 0,50 ^{a,b}	34,61 ± 0,46 ^{b,c,d}
M12	0,35	0,85	55,37 ± 0,50 ^{b,c,d}	5,68 ± 1,35 ^{a,b,c}	34,66 ± 1,58 ^{b,c,d}
Comercial 1	-	-	53,95 ± 0,30 ^{b,c}	10,69 ± 0,54 ^d	47,31 ± 1,97 ^f
Comercial 2	-	-	46,54 ± 0,33 ^a	19,91 ± 1,21 ^e	40,48 ± 0,66 ^e

Superíndices iguales muestran que no hay diferencia significativa entre los valores promedios (p = 0,05%).

Se observó que la muestra Comercial 2 presenta diferencias significativas (p = 0,05 %) en todos los parámetros referentes al color. De acuerdo con Paniagua (2015), el incremento de a* (verde-rojo) y la disminución de L* (luminosidad o claridad) se asocia a un color dorado más intenso en el rebozado al estudiar *nuggets* fritas. Tal fue el caso para esta croqueta ya que visualmente se percibe un color dorado más fuerte en el rebozado en comparación con el resto. Además, se sabe que dicha muestra contiene colorante INS 160c que según el código refiere a extracto de pimentón con un valor a* = 44,83. Por tanto, se cree que este factor puede influir en que el valor de a* de la Comercial 2 sea significativamente mayor al resto (Paredes, Peche y León 2019).

Cabe destacar que la croqueta Comercial 1 es la que exhibe una coloración más amarilla, lo cual se traduce en un mayor valor de b*, que es significativamente mayor al del resto de las muestras estudiadas (p = 0,05 %).

En la Figura 3 se pueden observar muestras de cada uno de los ensayos realizados (del M1 al M12), incluidas las croquetas comerciales.



FIGURA 3. De izquierda a derecha (% goma xantana en el interior - % goma xantana en el recubrimiento): Comercial 2, Comercial 1, M8 (0,25 % - 0,50 %), M12 (0,35 % - 0,85 %), M6 (0,15 % - 0,85 %), M10 (0,35 % - 0,15 %), M4 (0,15 % - 0,15 %), M5 (0,15 % - 0,50 %), M11(0,35 % - 0,50 %), M7 (0,25 % - 0,15 %), M9 (0,25 % - 0,85 %), M1 (0 % - 0,15 %), M2 (0 % - 0,50 %), M3 (0 % - 0,85 %).

Se realizó una ANOVA de dos factores para evaluar el impacto de la concentración de goma xantana en el relleno y el rebocado en los parámetros L^* , a^* y b^* ($p = 0,05 \%$), no observándose diferencia significativa para ningún parámetro bajo ningún efecto. Los valores obtenidos para el relleno fueron coherentes, debido a que el color fue analizado únicamente sobre el rebocado de la muestra, demostrando que el interior no tiene un efecto sobre este.

Evaluación sensorial

Con la intención de investigar si el producto con menor absorción de grasa desarrollado (M11: 0,35 % de goma xantana en el interior -0,50 % de goma xantana en el recubrimiento) es aceptado sensorialmente por parte de los consumidores, se efectuó una evaluación sensorial comparándola con sus homólogas del mercado.

Se obtuvo de los resultados de la evaluación que la frecuencia de consumo de productos empanados de todos los días representa un 7 %, 2 o 3 veces por semana un 60 %, una vez por semana un 31 % y nunca un 2 %. Tomando en cuenta estos resultados, se observó que más de la mitad de las personas evaluadas consumen este tipo de producto con una frecuencia alta, por lo que se considera relevante mejorar su perfil nutricional disminuyendo la absorción de aceite.

En segundo lugar, se aprecian los resultados para la aceptabilidad y la intención de compra de las croquetas en la Tabla 5.

TABLA 5. Aceptabilidad e intención de compra de las croquetas.

Muestra	Aceptabilidad	Intención de compra
Comercial 1	6,58 ± 0,17 ^a	5,00 ± 0,15 ^a
Comercial 2	6,99 ± 0,17 ^{a,b}	5,20 ± 0,15 ^{a, b}
Croqueta experimental	7,34 ± 0,17 ^b	5,56 ± 0,15 ^b

Superíndices iguales, dentro de una misma columna, muestran que no hay diferencia significativa entre los valores promedios ($p = 0,05 \%$).

Es importante destacar que si bien todas las muestras cumplen con el mínimo establecido para calidad, el producto desarrollado es el que tiene un mayor valor absoluto, siendo de 7,34 en una escala hedónica de 9 puntos. De acuerdo con lo preestablecido por Muñoz Muñoz, Civille y Carr (1992), el límite comercial o de calidad es de 6,0 en una escala de 9 puntos, por lo que todas las muestras evaluadas en este estudio superaron dicho número.

No se encontraron diferencias significativas ($p = 0,05 \%$) entre las muestras denominadas Comercial 1 y Comercial 2, ni tampoco entre Comercial 2 y la experimental. Sin embargo, sí se encontraron diferencias significativas ($p = 0,05 \%$) al comparar Comercial 1 y experimental. Monção et al. (2013) reportaron valores al mismo nivel para *nuggets* de pollo empanadas prefritas congeladas y fritas como método de cocción final, donde los puntajes obtenidos variaron entre 6,2 y 6,4 para las muestras estudiadas, siendo estos valores superiores a lo mínimo aceptable en cuanto a calidad (Muñoz, Civille y Carr, 1992).

Se observó que las muestras Comercial 1 y Comercial 2 no presentaron diferencias significativas entre ellas en cuanto a la intención de compra ($p = 0,05\%$). No obstante, al comparar Comercial 1 y la experimental sí son diferentes significativamente. Se puede establecer una relación entre la aceptabilidad y la intención de compra.

Se calcularon las frecuencias acumuladas para la crocancia de muestra en la pregunta JAR que revela la Figura 4. Se destaca que hubo una mayor proporción de consumidores que calificaron los productos Comercial 1 (44 %) y el producto experimental (44 %) como "Lo justo" en cuanto a crocancia y no presentaron diferencias significativas entre ellas ($p = 0,05 \%$). Sin embargo, la croqueta Comercial 2 fue evaluada como "Muy crocante" por el 92 % de los consumidores y sí se encontraron diferencias significativas con las anteriormente descritas ($p = 0,05 \%$).

Si bien se observó que Comercial 1 y el producto experimental obtuvieron resultados iguales de lo justo a cuanto crocancia, el 35 % de los consumidores clasificaron a la experimental como "Poco crocante" y el 21 % como "Muy crocante", mientras que tan solo un 24 % clasificaron como "Poco crocante" a Comercial 1 y un 32 % como "Muy crocante". Estos resultados se pueden relacionar con los obtenidos en el análisis de textura (Tabla 4), siendo que la Comercial 1 (0,93 N) necesitó significativamente ($p = 0,05 \%$) mayor fuerza para ser penetrada en comparación con la croqueta experimental (0,53 N). Por otro lado, la croqueta Comercial 2 requiere 1,42 N para ser penetrada, valor significativamente mayor a los mencionados anteriormente, el cual es coherente con el resultado de la evaluación sensorial.

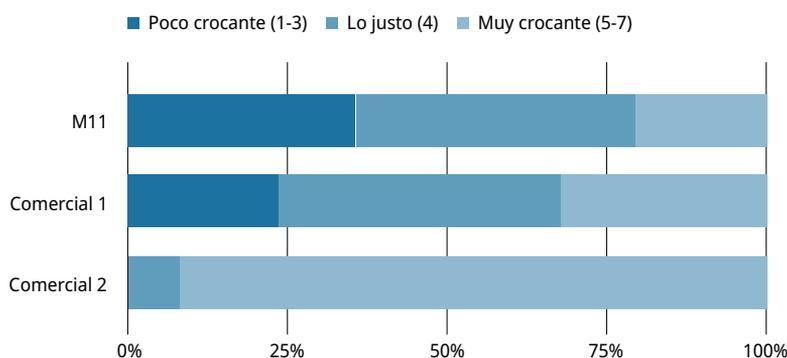


FIGURA 4. Frecuencia acumulada para cada franja en la pregunta JAR de crocancia.

Se puede observar en la Figura 5 la frecuencia de uso de los términos que los consumidores consideraron adecuados para describir las distintas muestras de acuerdo con la pregunta CATA. Entre los 16 atributos expuestos, la croqueta experimental presentó diferencias significativas en 11 descriptores con una o ambas muestras del mercado ($p = 0,05 \%$). Dentro de los términos más relevantes a la hora de describir la formulación propuesta se encuentran: rica, blanda, casera y suave.

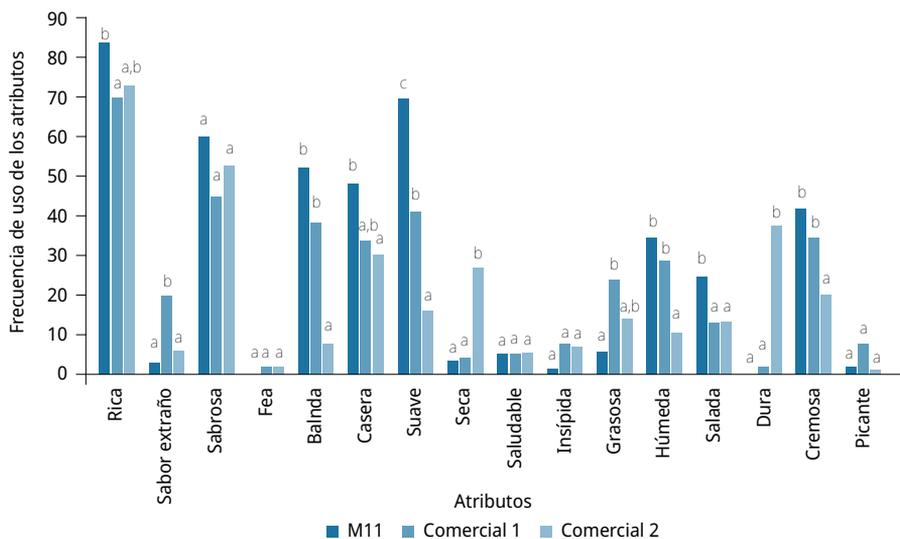


FIGURA 5. Frecuencia de uso de los términos sensoriales incluidos en la pregunta CATA para las croquetas. Letras iguales muestran que no hay diferencia significativa entre los valores promedios ($p = 0,05 \%$).

En la Figura 6 se muestra el Análisis de Componentes Principales (PCA) que representa la ubicación de los productos del análisis sensorial respecto a sus características más relevantes. La muestra experimental se describe como “Suave”, “Húmeda”, “Salada”, “Casera” y “Blanda”, mientras que la Comercial 2 se identificó como “Dura” y “Seca”. Por otro lado, la Comercial 1 se consideró “Picante”, “Grasosa” y “Con sabor extraño”.

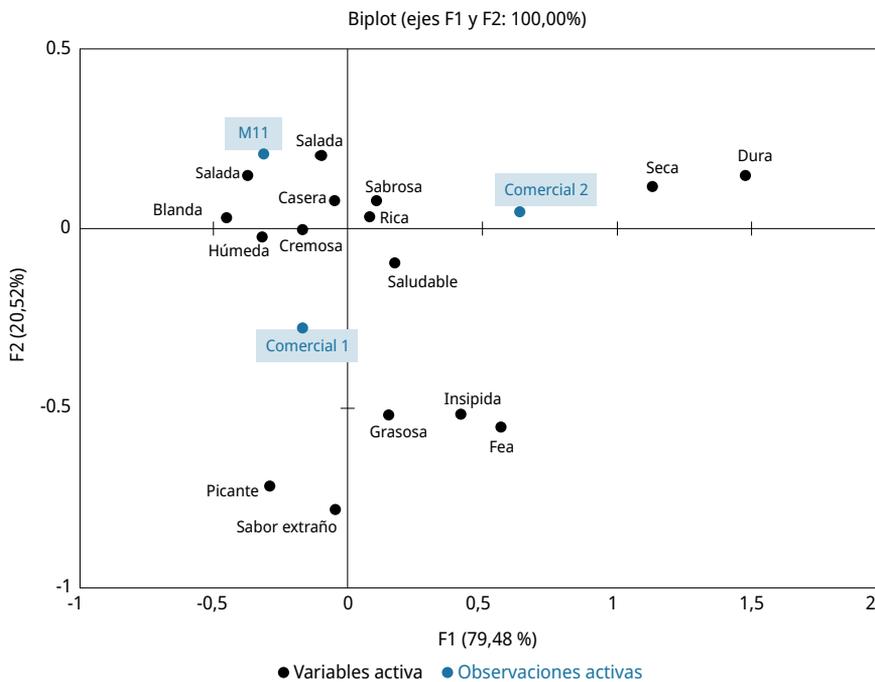


FIGURA 6. Análisis de Componentes Principales (PCA) de la matriz formada por muestral como filas y términos de la pregunta CATA como columnas.

Es interesante mencionar que un 52 % de los consumidores percibieron la muestra experimental como blanda. Algunos autores mencionan que la incorporación de harina de arroz es menos eficaz como agente de textura que el rebozado a base de trigo y esto se relaciona con la ausencia de gluten (Soto et al., 2015). Sin embargo, se considera que este atributo no afecta negativamente la percepción general de los consumidores ya que fue la muestra que presentó una mayor aceptabilidad y, a su vez, el rebozado fue percibido como lo justo en cuanto a crocancia.

Otro atributo para destacar de la muestra experimental fue la característica “Húmeda”. Este hecho es coherente con los estudios llevados a cabo por Sakhale et al. (2011), quienes reportaron que al adicionar una película de goma xantana al 1,5 % en samosas, se obtuvo una humedad del 28,96 % mayor a la muestra control. Además, Sahin, Sumnu y Altunakar (2005) encontraron que el contenido de humedad en los *nuggets* de pollo frito cubiertos con goma xantana fue 12,5 % más que la muestra control.

CONCLUSIONES

En relación con los resultados obtenidos, se logró elaborar una croqueta de papa prefrita congelada con un perfil nutricional más saludable que sus homólogas del mercado. La formulación innovadora, combinada con un proceso de producción eficiente, posiciona a este producto como una opción atractiva para consumidores preocupados por su salud y bienestar. Estos resultados abren nuevas perspectivas para la industria alimentaria y representan una oportunidad de negocio prometedora. La alta aceptabilidad del producto

indica un potencial de mercado significativo, especialmente considerando la creciente demanda de alimentos saludables y convenientes. Además, la reducción significativa del contenido de grasa contribuye a la prevención de enfermedades crónicas relacionadas con la dieta. En este sentido, se considera que aún deberían llevarse a cabo investigaciones más profundas para evaluar el impacto que tendría la información nutricional, específicamente el contenido de grasa, en la aceptabilidad e intención de compra del producto.

REFERENCIAS

- AOAC International, 2007. *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 18a ed. Gaithersburg: AOAC. Official Method AOAC 2003.05.
- Balasubramaniam, V. M.; Chinnan, M. S.; Mallikarjunan, P. y Phillips, R. D., 1997. The effect of edible film on oil uptake and moisture retention of a deep-fat fried poultry product. En: *Journal of Food Process Engineering*, 20(1), pp. 17-29. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1997.tb00408.x>
- Chen, H. H.; Kang, H. Y. y Chen, S. D., 2008. The effects of ingredients and water content on the rheological properties of batters and physical properties of crusts in fried foods. En: *Journal of Food Engineering*, 8(1), pp. 45-54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.01.017>
- FAO y OMS, 2002. *Consecuencias para la salud de acrilamidas en alimentos* [En línea]. Ginebra: OMS. [Consulta: 12 de agosto de 2023]. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/42635>
- Kuntz, L., 1995. *Building better fried foods. Natural products insider* [En línea]. [s.l.]: Informa. [Consulta: 12 de agosto de 2023]. Disponible en: <https://www.naturalproductsinsider.com/foods/building-better-fried-foods>
- Lin, S. K., 2013. Handbook of polymers. By George Wypych. En: *Polymers*, 5(1), pp. 225-233. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym5010225>
- Lumivero, 2024. *XLSTAT statistical and data analysis solution*. Vers. 2023.3.1. New York: Lumivero.
- Mestdagh, F.; De Wilde, T.; Fraselle, S.; Govaert, Y.; Ooghe, W.; Degroodt, J. M.; Verhé, R.; Van Peteghem, C. y De Meulenaer, B., 2008. Optimization of the blanching process to reduce acrylamide in fried potatoes. En: *LWT - Food Science and Technology*, 41(9), pp. 1648-1654. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.10.007>
- Monção, E.; Souza, P.; Monte, A.; Damaceno, M.; Silva, E.; Silva, M. y Nunes, R., 2013. Elaboración de nuggets de subproductos de pollo [En línea]. En: *La Industria Cárnica Latinoamericana*, 185, pp. 46-50. [Consulta: 12 de agosto de 2023]. Disponible en: <http://www.publitec.com.ar/contenido/objetos/Elaboracionyevaluacionsensorial.pdf>
- Montes, N.; Millar, I.; Provoste, R.; Martínez, N.; Fernández, D.; Morales, G. y Valenzuela R., 2016. Absorción de aceite en alimentos fritos. En: *Revista Chilena de Nutrición*, 43(1), pp. 87-91. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182016000100013>
- Muñoz, A. M.; Civille, G. V. y Carr, B. T., 1992. *Sensory evaluation in quality control*. Nueva York: Springer.
- Norizzah, A. R.; Junaida, A. R.; Maryam y Afifah A. L., 2016. Effects of repeated frying and hydrocolloids on the oil absorption and acceptability of banana fritters [En línea].

- En: *International Food Research Journal*, 23(2), pp. 694-699. [Consulta: 12 de agosto de 2023]. Disponible en: [http://ifrj.upm.edu.my/23%20\(02\)%202016/\(33\).pdf](http://ifrj.upm.edu.my/23%20(02)%202016/(33).pdf)
- Paniagua, N., 2015. *Aplicación de harinas extrusionadas en la mejora de la calidad de rebozados* [En línea]. Valladolid: Universidad de Valladolid. [Consulta: 12 de agosto de 2023]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/211097965.pdf>
- Panduro Castañeda, C. E., 2015. *Efecto de la sustitución de harina de trigo por harina de quinua (chenopodium quinoa) sobre el contenido de proteína, color, firmeza y aceptabilidad general de nuggets de pollo* [En línea]. Trujillo: Universidad Privada Antenor Orrego. [Consulta: 12 de agosto de 2023]. Disponible en: https://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/20.500.12759/850/1/PANDURO_CESAR_SUSTITUCI%c3%93N%20HARINA_TRIGO_QUINUA.pdf
- Paredes, A.; Peche, J. y León, N., 2019. Índice de carotenoides de pimiento morrón (*Capsicum annuum*) basado en la medición de color, utilizando imágenes hiperespectrales y digitales. En: *Scientia Agropecuaria*, 10(4), pp. 532-539. DOI: <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.04.10>
- Sahin, S.; Sumnu, G. y Altunakar, B., 2005. Effects of batters containing different gum types on the quality of deep-fat fried chicken nuggets. En: *Journal of Food Science and Agriculture*, 85, pp. 2375-2379. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.2258>
- Sakhale, B. K.; Badgujar, J. B.; Pawar, V. D. y Sananse, S. L., 2011. Effect of hydrocolloids incorporation in casing of samosa on reduction of oil uptake. En: *Journal of Food Science and Technology*, 48(6), pp. 769-772. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0333-0>
- Sharma, H. K.; Kaur, B.; Sarkar, B. C. y Singh, C., 2006. Thermal behavior of pure rice bran oil, sunflower oil and their model blends during deep fat frying. En: *Grasas y Aceites*, 57(4), pp. 376-381. DOI: <https://doi.org/10.3989/gya.2006.v57.i4.62>
- Soto, S.; Boluda-Aguilar, M.; Esnoz, E.; Iguaz, A. y López A., 2015. Texture, oil adsorption and safety of the european style croquettes manufactured at the industrial scale. En: *Food Engineering Reviews*, 8, pp. 181-200. DOI: <https://doi.org/10.1007/S12393-015-9130-2>
- Tan, K. J. y Mittal, G. S., 2006. Physicochemical properties changes of donuts during vacuum frying. En: *International Journal of Food Properties*, 9(1), pp. 85-98. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942910500473947>

Efecto de concentraciones de etanol en las características fisicoquímicas, microbiológicas y sensoriales de un extracto obtenido de *Vanilla planifolia*

Effect of ethanol concentrations on the physicochemical, microbiological and sensory characteristics of an extract obtained from *Vanilla planifolia*

Efeito das concentrações de etanol nas características físico-químicas, microbiológicas e sensoriais de um extracto obtido a partir de *Vanilla planifolia*

 **CARLOS JULIO TUBAY BERMÚDEZ** (1)

 **JOSÉ CEDEÑO VELASCO** (2)

 **KAROL BRIGITTE MOREIRA JIMÉNEZ** (3)

 **LUISA ANA ZAMBRANO MENDOZA** (4)

 **GEORGE GARCÍA MERA** (5)

 **KAROL YANNELA REVILLA-ESCOBAR** (6)

(1) Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta, Ecuador.

(2) Departamento de Posgrado, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta, Ecuador.

(3) Universidade Da Beira Interior, Covilha, Portugal.

(4) Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Calceta, Ecuador.

(5) Facultad Ciencias de la Vida y Tecnológicas, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta, Ecuador.

(6) Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Esmeraldas, Ecuador.

RECIBIDO: 14/4/2024 → APROBADO: 21/6/2024 ✉ tubaycarlos21@outlook.es

RESUMEN

La vainilla es uno de los aromas de mayor importancia a nivel comercial y es empleada en industrias como la farmacéutica, aromaterapia, perfumería y de alimentos. Sin embargo, los procesos de fabricación de estos productos podrían implicar operaciones que pueden afectar el medio ambiente y la salud de los consumidores. El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar las características fisicoquímicas, microbiológicas y sensoriales de extractos hidroalcohólicos obtenidos de *V. planifolia* a concentraciones de T1:25, T2:35 y T3:45 % de solvente. Los resultados obtenidos demostraron que la

concentración de etanol sí influyó en el pH, los sólidos solubles, la densidad y la acidez titulable, observándose que a mayor concentración del solvente T3 el pH fue mayor (4,96). En el caso de los sólidos solubles, la acidez titulable y la densidad en el tratamiento control, se obtuvieron niveles más altos 20,10; 0,33 y 1,08 respectivamente. Los extractos obtenidos presentaron niveles permisibles de mohos, levaduras, recuentos de aerobios y ausencia de *Salmonella spp*, según las normas internacionales; y finalmente el T3 tuvo mayor aceptividad en características sensoriales como color, textura y apariencia general, mientras que el T2 obtuvo una mayor aceptación en el aroma. Los hallazgos sugieren que los extractos de *V. planifolia*, al cumplir con los estándares de calidad, podrían ser utilizados como una alternativa viable de aromatizante natural en la industria alimentaria, reduciendo la dependencia de productos sintéticos.

Palabras clave: beneficiada, esencia, microorganismos patógenos, organolépticos, solvente.

ABSTRACT

Vanilla is one of the most commercially important flavorings and is used in industries such as pharmaceuticals, aromatherapy, perfumery and food. However, the manufacturing processes of these products could involve operations that can affect the environment and the health of consumers. The present work aimed to evaluate the physicochemical, microbiological and sensory characteristics of hydroalcoholic extracts obtained from *V. planifolia* at concentrations of T1:25, T2:35 and T3:45 % solvent. The results obtained showed that the concentration of ethanol did influence pH, soluble solids, density and titratable acidity, observing that the higher the concentration of solvent T3 the higher the pH was 4.96, in the case of soluble solids, titratable acidity and density in the control treatment, higher levels were obtained 20.10; 0.33 and 1.08 respectively. The extracts obtained presented permissible levels of molds, yeasts, aerobic counts and absence of *Salmonella spp*, according to international standards; and finally, T3 had higher acceptability in sensory characteristics such as color, texture and general appearance, while T2 obtained higher acceptability in aroma. The findings suggest that *V. planifolia* extracts, when complying with quality standards, could be used as a viable alternative natural flavoring agent in the food industry, reducing dependence on synthetic products.

Keywords: beneficiate, essence, pathogenic microorganisms, organoleptic, solvent.

RESUMO

A baunilha é um dos aromas mais importantes do ponto de vista comercial e é utilizada em indústrias como a farmacêutica, a aromaterapia, a perfumaria e a alimentar. No entanto, os processos de fabrico destes produtos podem envolver operações que podem afetar o ambiente e a saúde dos consumidores. O presente trabalho teve como objetivo avaliar as características físico-químicas, microbiológicas e sensoriais dos extractos hidroalcoólicos obtidos de *V. planifolia* nas concentrações de T1:25, T2:35 e T3:45 % de solvente. Os resultados obtidos mostraram que a concentração de etanol influenciou o pH, os sólidos

solúveis, a densidade e a acidez titulável, observando-se que quanto maior a concentração do solvente T3 maior foi o pH (4,96). No caso dos sólidos solúveis, da acidez titulável e da densidade no tratamento de controlo, obtiveram-se níveis mais elevados 20,10, 0,33 e 1,08 respetivamente. Os extractos obtidos apresentaram níveis admissíveis de bolores, leveduras, contagens aeróbias e ausência de *Salmonella spp.*, de acordo com as normas internacionais; e, finalmente, T3 teve maior aceitabilidade em características sensoriais como cor, textura e aspeto geral, enquanto T2 obteve maior aceitabilidade no aroma. Os resultados sugerem que os extractos de *V. planifolia*, quando cumprem as normas de qualidade, podem ser utilizados como um aroma natural alternativo viável na indústria alimentar, reduzindo a dependência de produtos sintéticos.

Palavras-chave: beneficiado, essência, microorganismos patogénicos, organolético, solvente.

INTRODUCCIÓN

Vainilla planifolia es una planta que pertenece a la familia de las *Orcidaceae*, la cual está conformada por alrededor de 110 especies y es originaria de Centroamérica (Nàjera Hernández y Coutiño Cortès, 2023). Los principales países productores son Madagascar, Indonesia, China y México (Baqueiro-Peña y Guerrero-Beltrán, 2013). En Ecuador recién se han identificado zonas que cuentan con las condiciones idóneas para su siembra, por lo que su cultivo se encuentra en fase de desarrollo y exportación en provincias de la Amazonia, Santo Domingo y Manabí (Quintana Lombeida y Aguilar Herrera, 2020).

Los aditivos sintéticos han sido utilizados desde hace muchas décadas como un ingrediente importante del proceso de los alimentos, donde son añadidos ya sea de manera directa o indirecta (ELshreif et al., 2023). Sin embargo, su uso inadecuado estaría relacionado a problemas gastrointestinales, dermatológicos, neurológicos y respiratorios en los consumidores (Sambu et al., 2024; Sulieman et al., 2023), lo que está llamando la atención de la comunidad científica con respecto al consumo de estos productos.

Según Gallage y Møller (2018), la vainilla es uno de los aromatizantes más apreciados en industrias como la de alimentos, perfumería, cosmética y medicina. Sin embargo, solo el 10 % del mercado mundial proviene de productos obtenidos de vainilla natural (D'Arrigo et al., 2024), mientras que el 90 % es obtenido por vía sintética, entre ellos mediante la oxidación de la lignina, donde la vainilla se obtiene por sulfonación. Sin embargo, este tipo de procesos podría generar impacto negativo en el medioambiente (García-Rollán et al., 2024).

De la vainilla natural se pueden obtener productos como caviar, presentación en polvo, pasta, vainas beneficiadas y extracto de vainilla, siendo este último el de mayor demanda y el que puede ser obtenido por métodos como maceración, percolación y ultrasonidos (Salas et al., 2017). Sin embargo, la calidad de los extractos de vainilla puede estar influenciada por factores ambientales, genéticos y condiciones de extracción. Esto ha sido corroborado por autores como Razafimahatratra et al. (2023), quienes analizaron diferentes condiciones de obtención (tiempo de extracción, concentración de solvente y potencia de microondas) en los extractos de *V. planifolia* en Madagascar, observando un mayor rendimiento a partir de los 180 min, a una potencia de 480 w y a una concentración de 70 % de etanol.

Otro factor que puede condicionar la calidad de los extractos de vainilla es el tipo de solvente y su concentración. De acuerdo con Padio et al. (2010) y Yeh et al. (2022), el etanol es uno de los solventes más empleados para la obtención de extractos debido a que es considerado un producto de bajo riesgo, seguro y económico y, por ende, es idóneo para la extracción de compuestos bioactivos (Mora-Barrantes et al., 2022).

En los últimos años, estos extractos han ganado mayor popularidad debido a que, según estudios como el realizado por Sinsuebpol et al. (2023), poseen actividad antioxidante y antiinflamatoria, por lo que no solo pueden mejorar las cualidades sensoriales de los alimentos sino mejorar sus características nutricionales. Ante lo expuesto, se propone la siguiente investigación, la cual tiene como objetivo analizar el efecto de concentraciones de etanol en las características fisicoquímicas, microbiológicas y sensoriales de un extracto obtenido de *Vainilla planifolia*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recolección del material vegetal

Las vainas beneficiadas fueron recolectadas en la finca La Esperanza, ubicada en la parroquia San Plácido, en cantón Portoviejo, provincia de Manabí, Ecuador.

Obtención de los extractos

La extracción de los extractos se realizó por triplicado, para ello se pesaron 50 g de vaina beneficiada previamente trituradas y diluidas en 500 mL de etanol a concentraciones de 25, 35 y 45 % por tratamiento. La obtención se realizó por el método de baño ultrasonido en un equipo marca Branson modelo 3510 por un tiempo de 180 min a 40 kHz de potencia a una temperatura de 40 °C. Posteriormente, los extractos fueron filtrados en papel Whatman n° 1 y finalmente almacenados en envases color ámbar a 4 °C hasta su posterior análisis.

Caracterización fisicoquímica

Se realizaron análisis de caracterización fisicoquímica a los extractos naturales y una esencia de vainilla comercial marca El Sabor, de la industria Alimensabor, la cual fue adquirida en un centro de abastos de la ciudad de Manta.

Densidad

La densidad se evaluó por gravimetría según el método de referencia establecido en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 391. En una balanza analítica marca Kalstein, modelo YR05568, se tomaron los pesos de un picnómetro (15 mL) vacío, con agua destilada y con extracto (Servicio Ecuatoriano de Normalización-INEN, 2012).

Para determinar la densidad de los extractos se consideró la siguiente ecuación que se detalla a continuación:

$$d = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} * 1 \quad (1)$$

Donde,

d = la densidad.

m₂ = la masa de picnómetro con muestra.

m₁ = la masa de picnómetro con agua.

m₀ = la masa de picnómetro vacío.

pH

Se determinó según lo establecido por la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 0181. Para ello se introdujo el electrodo de un potenciómetro marca HANNA en los extractos, y posteriormente se realizaron las lecturas de pH (Servicio Ecuatoriano de Normalización- INEN, 1991).

Sólidos solubles

Para la determinación de sólidos solubles se utilizó el método AOAC 981.12, para lo cual se tomaron dos gotas de extracto y se depositaron en el prisma de un refractómetro (HANNA), se esperó un tiempo de 5 segundos y se realizó la lectura de los sólidos solubles (AOAC International, 1980a).

Acidez titulable

Se empleó el método de referencia AOAC 942.12. Para ello se utilizaron 5 mL de extracto, se añadió alcohol etílico al 96 % en un volumen igual a 5 veces el peso de la muestra y 5 gotas de solución indicadora de fenolftaleína. Se agitó hasta alcanzar una total disolución y se valoró con solución alcohólica de hidróxido de potasio KOH 0,1 mol/L (AOAC International, 1980b). El índice de acidez se calculó de la siguiente manera:

$$AcT = \frac{56.1 * V * Z}{g} \quad (2)$$

Donde,

V = mL de KOH 0,1 mol/L consumidos.

Z = concentración molar en equivalentes de la solución de KOH.

56,1 = miliequivalentes de KOH expresados en mg.

m = masa de la muestra en gramos.

Análisis microbiológico

La presencia de *Salmonella*, recuento de aerobios, mohos y levaduras en los extractos hidroalcohólicos de *V. planifolia* se llevó a cabo según la metodología establecida por Baez-Martínez (2014).

Análisis sensorial

Para el análisis sensorial se organizó un panel de 30 jueces aleatorios no entrenados, utilizando un test de preferencia por ordenamiento para evaluar la aceptabilidad y seleccionar el tratamiento con mejores características según las categorías evaluadas: aroma, sabor y astringencia. Al panel se le solicitó que después de la catación respondieran cuánto les gustó o disgustó cada uno de los tratamientos. Siendo: 1 = Me disgusta extremadamente y 9 = Me gusta extremadamente. En este análisis se incluyó la comparación de los tratamientos en estudio más una muestra de esencia de vainilla comercial marca El Sabor.

Análisis estadísticos

Los resultados fueron evaluados aplicando una prueba no paramétrica de Kruskal Wallis y una prueba post hoc de Dunn. Es necesario indicar que tanto la caracterización fisicoquímica como la sensorial fueron analizadas por triplicado y los resultados fueron procesados por el programa informático Infostat y por Past 4 (Di Rienzo et al., 2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización fisicoquímica

Como se puede observar en la Figura 1, la concentración de solvente influyó en el pH de los extractos, evidenciándose diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos. El T3 presentó un pH superior de $4,96 \pm 0,03$, mientras que el tratamiento de la marca comercial obtuvo un valor de $3,77 \pm 0,0$. En el caso de los extractos obtenidos de *V. planifolia* se puede observar que a mayor concentración de solvente el pH se incrementó. Estos resultados fueron inferiores a los presentados por Rivera Abascal et al. (2020), quienes evaluaron el efecto de la obtención por ultrasonidos de extractos de *V. planifolia* a tiempos que variaron entre 20 – 40 min, utilizando etanol como solvente a una concentración de 40 %. Sin embargo, fue superior al presentado por el mismo autor por el método de Soxhlet. Para Salah Eddine et al. (2016), el pH puede influir en la capacidad antioxidante de extractos, observándose una mayor capacidad de eliminar radicales libres a pH de entre 4-5; con esto concuerda Bayliak et al. (2016), quienes observaron que en medios alcalinos la actividad captadora de radicales libres baja.

En el caso de los sólidos solubles (Figura 2), se evidenciaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos, evidenciándose que este parámetro aumentó con relación a la concentración del solvente. En el caso del tratamiento comercial, presentó

una mayor concentración de sólidos solubles. Estos resultados fueron similares a los presentados por Calva-Estrada et al. (2018), quienes evaluaron las características físicoquímicas de extractos encapsulados de vainilla obtenidos por maceración. De la misma manera fueron mayores a los presentados por Suceveanu et al. (2018), quienes reportaron un valor de 26,07 °Brix en extractos artesanales de menta obtenidos por maceración usando etanol al 60 %. Los autores recalcaron que la concentración del solvente y el tiempo de extracción pueden incidir en la concentración de sólidos solubles.

Con relación al contenido de acidez de las muestras se situaron entre 0,11 y 0,33, evidenciándose que a menor concentración (T1), la acidez fue mayor, es decir que la concentración del solvente sí influyó (Figura 3). Sin embargo, con respecto al tratamiento de la marca comercial, fue el que presentó una mayor acidez. Es necesario mencionar que la acidez cumple un rol importante en las características sensoriales de los alimentos (Qiu 2023).

En la densidad, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos analizados (Figura 4), sin embargo, se observó que en el caso de los extractos naturales (T1, T2, T3), la concentración del solvente no influyó en este parámetro. Los valores obtenidos se encontraron entre lo que especifica la norma ISO 5565-2, la cual establece que la densidad de estos extractos debe ser superior a 0,83 g/cm³ l (Internacional Organization for Standardization, 2011).

Estos fueron inferiores a los encontrados por Clarenzia et al. (2020), quienes analizaron el efecto de las condiciones y el tiempo de almacenamiento de esencia de vainilla sintética en la densidad del producto, observando que a condiciones de refrigeración a cuatro semanas este parámetro fue superior a la obtenida en condiciones ambientales, lo cual también incide en la composición y concentración de algunos componentes dentro del extracto y por ende en su actividad biológica, lo que también es sustentado por Waszkowiak y Gliszczyńska-Świgło (2016).

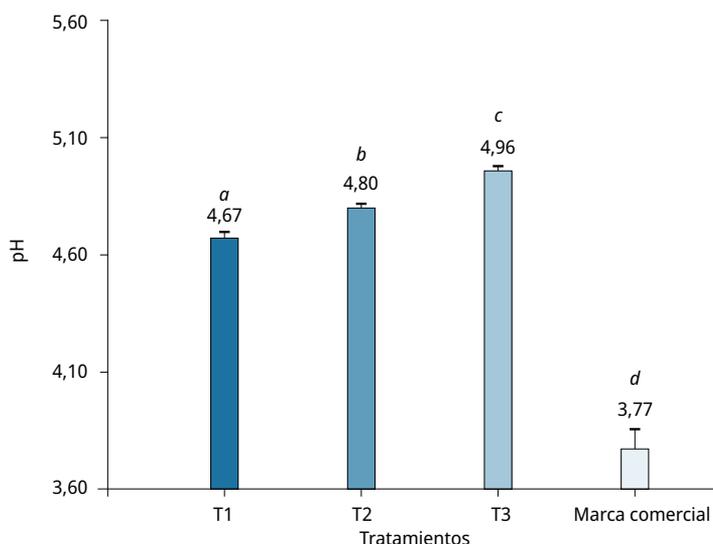


FIGURA 1. Resultados obtenidos en la variable pH. Letras diferentes representan diferencias significativas ($p < 0,05$) \pm Desviación estándar.

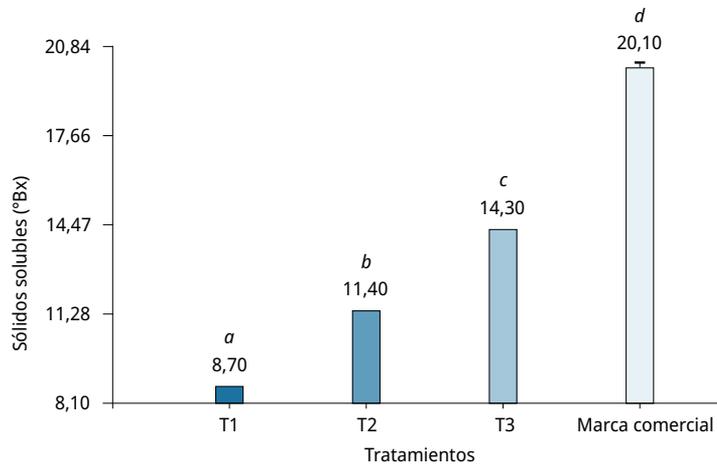


FIGURA 2. Resultados obtenidos en la variable sólidos solubles. Letras diferentes representan diferencias significativas ($p < 0,05$) \pm Desviación estándar.

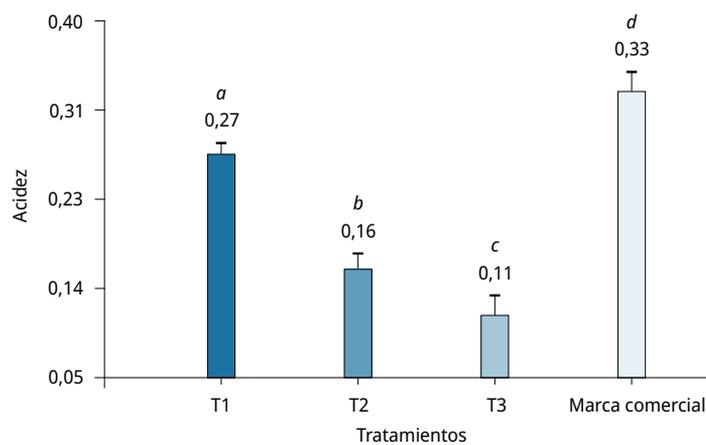


FIGURA 3. Resultados obtenidos en la variable acidez titulable. Letras diferentes representan diferencias significativas ($p < 0,05$) \pm Desviación estándar.

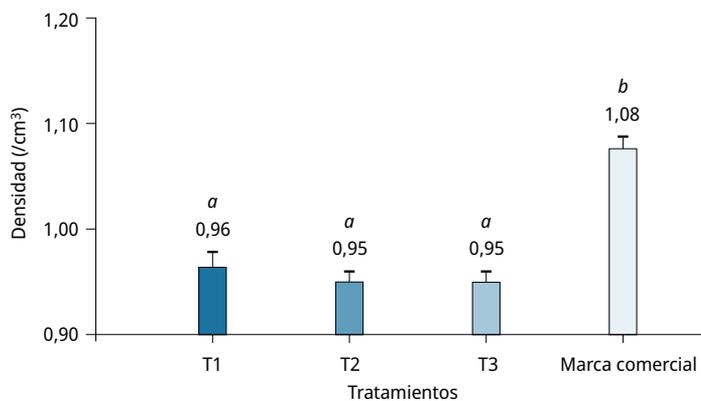


FIGURA 4. Resultados obtenidos en la variable densidad. Letras diferentes representan diferencias significativas ($p < 0,05$) \pm Desviación estándar.

Caracterización microbiana

TABLA 1. Caracterización microbiológica.

Tratamientos	Salmonela (UFC/g)	Mohos (UFC/g)	Levaduras (UFC/g)	Recuento de aerobios (UFC/g)
T1	No detectado	<1x10	1x10	1x10
T2	No detectado	<1x10	<1x10	<1x10
T3	No detectado	<1x10	<1x10	<1x10

Los resultados de análisis microbiológicos arrojaron que en 25 g de cada muestra no hubo presencia de *Salmonella spp.* En el caso de mohos y levaduras, los tratamientos 2 y 3 presentaron < 1x10 ufc/g, mientras que el T1 mostró 1x10 ufc/g. Con ello se demuestra que los extractos analizados cumplen con los requisitos de calidad establecidos en la norma Draft Tanzanian Standard TZS AFDC 05 (6194) (Tanzania Bureau of Standards, s.d.) para *Salmonella spp.*, mohos y levaduras.

Análisis sensorial

TABLA 2. Caracterización sensorial de los extractos de vainilla vs marca comercial.

Tratamientos	Color	Aroma	Textura	Apariencia general
T1	5, 40 ^A	5, 87 ^A	5,50 ^A	5,70 ^A
T2	5,67 ^{AB}	6,03 ^A	5,53 ^A	5,60 ^A
T3	6,27 ^{CB}	6,00 ^A	5,83 ^{AB}	6,23 ^{AB}
Marca comercial	6,60 ^{CD}	7,23 ^B	6,57 ^B	6,70 ^B
K*W. (H)	10,80	13,84	8,66	10,80

Letras diferentes representan diferencias significativas ($p < 0,05$). K*W = Prueba de Kruskal Wallis para datos no paramétricos.

Los resultados obtenidos en la caracterización sensorial se presentan en la Tabla 2, donde se determinó que la marca comercial presentó mayor intensidad en las categorías analizadas. Mientras que los tratamientos T1, T2 y T3 difieren significativamente en el color, textura y apariencia general; en el aroma no se observaron diferencias en los extractos naturales. Sin embargo, autores como Clarenzia et al. (2020) indican que los extractos naturales están constituidos por una gran variedad de compuestos que tienen un mayor potencial y por ende pueden brindar mejores características sensoriales a los alimentos, en especial con respecto al sabor.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la presente investigación demostraron que la concentración del solvente influyó en las características fisicoquímicas (aroma, sólidos solubles, acidez), mientras que en el caso de la densidad no evidenció diferencias significativas. Se pudo observar también que los extractos hidroalcohólicos obtenidos de *V. planifolia* presentaron niveles permisibles de mohos, levaduras, *Salmonella* y recuento de mesófilos, según lo establecido en normas de calidad internacionales. Por otro lado, en el análisis sensorial se observó que el T3 presentó resultados similares al tratamiento control (esencia de vainilla comercial). Es importante indicar que se deben continuar con estudios que consideren otras condiciones de obtención de extractos con la finalidad de mejorar las cualidades sensoriales de este producto, así como también el análisis de su composición química y actividades funcionales.

Por su parte, es necesario mencionar que existe muy poca información sobre extractos de *V. planifolia*, sus características y actividades biológicas, lo que representó una limitante durante el análisis, la interpretación y la discusión de las variables estudiadas con otros autores. *V. planifolia* es un cultivo que se encuentra en desarrollo vegetativo en la mayor parte del país, por lo que aún no existen productos obtenidos a partir de esta orquídea. Por tanto, en Ecuador todavía no hay una normativa que establezca los requisitos de calidad para estos productos. Por esta razón se tomaron como referencia normas internacionales y estudios realizados para la interpretación y discusión de resultados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de la presente investigación agradecen a Iván Saltos, propietario de la finca Cantero, por su contribución en conocimiento y material vegetal. Este tipo de acciones impulsa el desarrollo científico y fomenta la agroindustria de la vainilla en el país.

REFERENCIAS

- AOAC International, 1980a. *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 13a ed. Gaithersburg: AOAC. Official Method 981.12.
- AOAC International, 1980b. *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 13a ed. Gaithersburg: AOAC. Official Method 942.12.
- Baez-Martínez, V. H., 2014. *Estudio de la calidad microbiológica de vainas de vainilla (Vanilla planifolia) sometidas a diferentes tipos de beneficiado* [En línea]. (Tesis de Pregrado). Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. [Consulta: 14 de mayo del 2024]. Disponible en: <https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/36b4e3cf-aa66-44fe-bbbd-1cfb624163ed/content>
- Barrientos, C., 2004. La prueba de Kruskal-Wallis como herramienta para evaluar las diferencias en la distribución de tallas de las poblaciones de peces. En: *Revista de la Universidad Autónoma de Yucatán*, 19(228), pp. 47.

- Baqueiro-Peña, I. y Guerrero-Beltrán, J., 2013. Vanilla (*Vanilla planifolia* Andr.), its residues and other industrial by-products for recovering high value flavor molecules: A review. En: *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 6(1), pp. 1-9.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2016.10.003>
- Bayliak, M.; Burdyluk, N. y Lushchak, V., 2016. Effects of pH on antioxidant and prooxidant properties of common medicinal herbs. En: *Open Life Sciences*, 11(1), pp. 298-317.
DOI: <https://doi.org/10.1515/biol-2016-0040>
- Calva-Estrada, S.; Mendoza, R.; García, O.; Jiménez-Fernández, V. y Jiménez, M., 2018. Microencapsulation of vanilla (*Vanilla planifolia* Andrews) and powder characterization. En: *Powder Technology*, 323(5), pp. 416-423.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.10.035>
- Clarensia, V.; Kurniawan, J. y Lo, D., 2020. The changes in density, flavor compounds, and sensory description of vanilla extract after expiration. En: *International Conference on Eco Engineering Developmen*. Yacarta: IOP.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/794/1/012150>
- D'Arrigo, P.; Rossato L. A. M.; Strini, A. y Serra, S., 2024. From waste to value: recent insights into producing vanillin from lignin. En: *Molecules*, 29(2), pp. 2-32.
DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules29020442>
- Di Rienzo, J. A.; Casanoves, F.; Balzarini, M. G.; González, L.; Tablada, M. y Robledo, C.W., 2008. InfoStat [En línea]. Versión 2017.1.2. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba. [Consulta: 5 de junio de 2021]. Disponible en: <http://www.infostat.com.ar>
- Draft Tanzanian Standard [AFDC]. 2021. Natural Vanilla Extract Products — Specification. AFDC 05(6194) P3. Tanzania Bureau Of Standards. [https://www.tbs.go.tz/uploads/publications/en-1613397341-BCDC%201%20\(33\)%20DTZS.pdf](https://www.tbs.go.tz/uploads/publications/en-1613397341-BCDC%201%20(33)%20DTZS.pdf)
- ELshreif, H.; Elkhoudary, M.; Abdel-Salam, M.; Hadad, G. y El-Gendy, A., 2023. A review on food additives from the definition, and types to the method of analysis. En: *Records of Pharmaceutical and Biomedical Sciences*, 7(1), pp. 49-64.
DOI: <https://doi.org/doi:10.21608/rpbs.2023.190784.1210>
- Gallage, N. J. y Møller, B. L., 2018. Vanilla: the most popular flavour. En: Lange, B. y Wüst, M. *Biotechnology of natural products*. Berlín: Springer. pp. 3-24.
DOI: https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-67903-7_1
- García-Rollán, M.; Rivas-Márquez, M. N.; Bertran-Llorens, S.; Deuss, P. J.; Ruiz-Rosas, R.; Rosas, J. M.; Rodríguez-Miraso, J. y Cordero, T., 2024. Biobased vanillin production by oxidative depolymerization of kraft lignin on a nitrogen- and phosphorus-functionalized activated carbon catalyst. En: *Energy & Fuels*, 38(8), pp. 7018-7032.
DOI: <https://doi.org/DOI:10.1021/acs.energyfuels.4c00108>
- Internacional Organization for Standardization [2011]. ISO 5565-2. *Vanilla fragrans (Salisbury) Ames. Part 2: Test methods*. Ginebra: ISO.
- Mora-Barrantes, J.; Morera-Ramos, L.; Ulate-Salas, M.; Núñez-Agüero, V.; Acuña-Salazar, E. y Cordero-Carvajal, M., 2022. Clasificación del riesgo químico de solventes orgánicos mediante la aplicación del método "CHEM21 selection guide of classical- and less classical-solvents". En: *Tecnología en Marcha*, 35(1), pp. 28-43.
DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v35i1.5370>
- Nàjera Hernández, M. y Coutiño Cortès, A., 2023. Fermentación de vainas de *Vanilla planifolia*. En: *Ibsiencias*, 16(5), pp. 30-45.

- Pardio, V.; Waliszews, K. y Flores, A., 2010. Effects of different vanilla extraction methods on sensory and colour properties of vanilla ice creams during storage. En: *Food Science+Technology*, 45(2), pp. 344-347.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02143.x>
- Qiu, X., 2023. Sour and tangy: The importance of acids in food and their impact on health. En: *Journal of Food Technology and Preservation*, 7(3), pp. 1-2.
- Quintana Lombeida, M. D. y Aguilar Herrera, J. V., 2020. Desarrollo de cultivos sostenibles de vainilla en Ecuador. En: *Talentos*, 7(1), pp. 71-79.
DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.33789/talentos.7.1.123>
- Razafimahatratra, E.; Robijaona, B.; Rakotojaona, A.; Ranjatoson, N.; Rabearisoa, R. y Koto-Te-Nyiwa, N., 2023. Microwave-assisted extraction of vanillin from Madagascar Vanilla planifolia beans: optimization and modeling. En: *Natural Resources for Human Health*, 3(3), pp. 370-378. DOI: <https://doi.org/10.53365/nrfhh/169229>
- Rivera Abascal, I.; Carmona García, R.; Lopez Cruz, J.; Nolasco Baltazar, D. y Pérez Silva, A., 2020. Caracterización fisicoquímica y sensorial de extractos hidroalcohólicos de vainilla obtenidos por extracción. En: *Coloquio de Investigación Multidisciplinaria*, 8(1), pp. 1740-1746.
- Salah Eddine, L.; Djamila, B. y Mohammed Redha, O., 2016. Solvent pH extraction effect on phytochemical composition and antioxidant properties of Algerian Matricaria Pubescens. En: *Journal of Pharmacy Research*, 10(3), pp. 106-112.
- Salas, Y.; Chavèz, L.; Hernández, I. y Hernández, J., 2017. Extracción y caracterización de aceite absoluto de Vainilla. En: *Revista de Sistemas Experimentales*, 4(13), pp. 1-7.
DOI: https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Sistemas_Experimentales/vol4num13/Revista_de_Sistemas_Experimentales_V4_N13_1.pdf
- Sambu, S.; Hemaram, U.; Murugan, R. y Alsofi, A., 2024. Toxicological and teratogenic effect of various food additives: an updated review. En: *BioMed Research International*, 2022(5), pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2024/9792751>
- Servicio Ecuatoriano de Normalización-INEN, 2012. INEN 391: *Requisitos para la mezcla de aceites vegetales comestibles*. Quito: INEN.
- Servicio Ecuatoriano de Normalización-INEN, 1991. INEN ISO 0181: *Conservas envasadas de pescado. Determinación de cloruros y el índice de PE-pH*. Quito: INEN.
- Sinsuebpol, C.; Burapapadh, K.; Chowjaroen, V. y Changsan, N., 2023. The radical scavenging activity of vanillin and its impact on the healing properties of wounds. En: *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, 14(2), pp. 99-104.
DOI: https://doi.org/https://doi.org/10.4103/japtr.japtr_631_22
- Suceveanu, M.; Irina-Claudia, A.; Oana-Irina, P.; Luminita Finaru, G. y Adriana-Luminita, F., 2018. Physicochemical characterization and acceptability of some artisanal mint liqueurs. En: *Scientific Study & Research Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*, 10(2), pp. 203-210.
- Suliman A, M. E.; Abdallah, E. M.; Alanazi N, A.; Ed-Dra, A.; Jamal, A.; Idriss, H.; Alshammari, A. S. y Shommo S, A. M., 2023. Spices as sustainable food preservatives: a comprehensive review of their antimicrobial potential. En: *Pharmaceuticals*, 16(4), pp. 1-36.
- Tanzania Bureau of Standards, s.d. AFDC 05(6194) P3: *Natural vanilla extract products — Specification*. [s.l.]: TBS.

Waszkowiak, K. y Gliszczyńska-Świgło, A., 2016. Binary ethanol–water solvents affect phenolic profile and antioxidant capacity of flaxseed extracts. En: *European Food Research and Technology*, 242(4), pp. 777–786.

DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00217-015-2585-9>

Yeh, C.; Chou, C.; Wu, C.; Chu, L.; Huang, W. y Chen, H., 2022. Effects of different extraction methods on vanilla aroma. En: *Molecules*, 27(14), pp. 1-12.

DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/molecules27144593>

Potencial de energía geotérmica de muy baja temperatura de Uruguay para colectores verticales cerrados

Potential of very low enthalpy geothermal energy of Uruguay for closed vertical collectors

Potencial de energia geotérmica de entalpia muito baixa do Uruguai para coletores verticais fechados

 **MARTÍN DOS SANTOS LAFUENTE** (2)

 **CINTIA ALCOBA RODRÍGUEZ** (2)

 **ETHEL MORALES** (1)

 **CARLOS BELLO CÁCERES** (2)

(1) Instituto de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay.

(2) Ingeniería en Energías Renovables, Universidad Tecnológica, Uruguay

RECIBIDO: 16/7/2024 → APROBADO: 23/11/2024 ✉ martin.dossantos@utec.edu.uy

RESUMEN

Actualmente, existe a nivel mundial una marcada tendencia a fortalecer la transición energética, favoreciendo el uso y diversificación de energías renovables bajas en carbono. Las energías eólica, solar y biomasa son las más comunes, pero existen otras fuentes como la geotermia de muy baja entalpía. Esta última aprovecha el calor acumulado en los primeros metros del subsuelo, principalmente para la climatización de edificaciones. En este trabajo se presenta el primer mapa de potencial geotérmico de muy baja temperatura para colectores verticales cerrados, del territorio nacional, elaborado a partir de la cartografía geológica e hidrogeológica existente y lo establecido en la norma alemana VDI 4640-2 (Verein Deutscher Ingenieure, 2019) para el uso de colectores verticales cerrados. Los resultados obtenidos indican que Uruguay presenta un potencial de extracción de calor de las rocas de medio a alto (superior a 40 W/m) en más del 60 % de su territorio. Ese potencial de energía podría utilizarse tanto para climatizar edificios como para proporcionar soluciones térmicas a varias de las actividades que se desarrollan en el país (actividad forestal, papeleras, cultivos de cereales, lechería, entre otras) o fomentar el desarrollo de nuevas actividades productivas, por tratarse de una energía continua, eficiente y ambientalmente amigable.

Palabras clave: energías renovables, geotermia somera, climatización de espacio.

ABSTRACT

Currently it is a clear worldwide trend to strengthen the energy transition, favoring the use and diversification of renewable, low-carbon and environmentally friendly energies. Wind, solar and biomass energy are the most common, but there are other sources, such as the shallow geothermal energy. The latter takes advantage of the heat accumulated in the first meters of the subsoil for the heating and cooling of urban districts. This study presents the first map of shallow geothermal potential of Uruguay, for closed vertical collectors, based on the available geological and hydrogeological cartography and the German standard VDI 4640-2 (Verein Deutscher Ingenieure, 2019). The results indicate that Uruguay has a potential for medium to high heat extraction from rocks (greater than 40 W/m) in more than 60 % of its territory. This shallow geothermal energy potential could be used both for air-condition buildings and to provide thermal solutions to several of the activities carried out in the country (forestry, paper mills, cereal crops, dairy farming, among others) or promote the development of new productive activities, because it is a continuous, efficient and environmentally friendly energy. **Keywords:** renewable energy, shallow geothermal energy, heating and cooling buildings.

RESUMO

Atualmente, existe uma tendência acentuada a nível mundial para o reforço da transição energética, favorecendo a utilização e a diversificação de energias renováveis de baixo carbono. As energias eólica, solar e de biomassa são as mais comuns, mas existem outras fontes, como a energia geotérmica de muito baixa entalpia. Esta última aproveita o calor acumulado nos primeiros metros do subsolo principalmente para a climatização dos edifícios. Este trabalho apresenta o primeiro mapa de potencial geotérmico de muito baixa temperatura para o território nacional, elaborado a partir da cartografia geológica e hidrogeológica existente e do que está estabelecido na norma alemã VDI 4640-2 (Verein Deutscher Ingenieure, 2019) para utilização de coletores verticais fechados. Os resultados obtidos indicam que o Uruguai possui um potencial médio a alto de extração de calor das rochas (superior a 40 W/m) em mais de 60 % do seu território. Este potencial energético poderá ser aproveitado tanto para climatizar edifícios, como para fornecer soluções térmicas a diversas das atividades desenvolvidas no país (silvicultura, fábricas de papel, culturas cerealíferas, laticínios, entre outras) ou promover o desenvolvimento de novas atividades produtivas, porque é uma energia contínua, eficiente e ecologicamente correta. **Palavras-chave:** energias renováveis, energia geotérmica superficial, climatização espacial.

INTRODUCCIÓN

El potencial geotérmico existente en un determinado lugar refiere a la energía contenida en los materiales de la corteza terrestre en forma de calor que puede ser aprovechada para distintos fines, tales como la producción de energía eléctrica cuando la temperatura y presión del subsuelo a determinadas profundidades son las adecuadas, o el uso directo del calor latente a poca profundidad de la superficie. La energía geotérmica de muy baja

entalpía (o somera) hace referencia a la energía térmica que contienen los materiales geológicos más superficiales (rocas, sedimentos y aguas subterráneas); en general el recurso se encuentra a menos de 30 °C. No se trata de aprovechar la energía térmica del suelo para generar electricidad, sino de su utilización directa en la climatización de edificios o en procesos industriales (secado de madera y cueros, deshidratación de leche o frutas, piscicultura, entre otros). Para trasladar este efecto a los espacios a climatizar se necesitan bombas de calor, la misma tecnología de los aparatos de aire acondicionado pero reversible, para que genere tanto frío como calor. También es necesaria la implementación de intercambiadores geotérmicos para permutar el calor con el subsuelo (García et al., 2020).

La geotermia de muy baja entalpía representa un recurso inmenso, ubicuo en todo tipo de terreno y versátil, capaz de ayudar a satisfacer la demanda de energía de la población mundial y de reducir la utilización de combustibles fósiles como energía primaria. A pesar de estas características y de que la energía geotérmica es ambientalmente eficiente, ya que sus emisiones se componen prácticamente de vapor de agua (Santoyo y Barragán-Reyes, 2010), no ha conseguido implantarse de forma masiva en la sociedad. La barrera más importante que lo ha impedido hasta el momento ha sido su costo inicial, ya que la construcción de los intercambiadores requiere una inversión económica importante. Pero la inmensidad del reto ambiental al que se enfrenta la humanidad no puede permitirse desperdiciar un recurso como la geotermia (García et al., 2020).

La explotación de la geotermia de muy baja entalpía, a diferencia de la geotermia de alta y muy alta entalpía, no está vinculada a puntos calientes del subsuelo ni a aguas termales. Puede explotarse en prácticamente cualquier lugar y su ubicuidad es una de las ventajas más representativas (Alcaraz y Vives, 2016). Debe su aplicabilidad a que, si bien en los primeros metros del subsuelo la temperatura responde al comportamiento estacional, a medida que aumenta la profundidad tiende a estabilizarse (en el entorno de los 15 metros). Esta temperatura es constante a lo largo de todo el año y se aproxima a la media anual del aire en el punto geográfico (García et al., 2020).

Para explotar la geotermia de muy baja entalpía se han diseñado diferentes tipos de infraestructura, los cuales a grandes rasgos se pueden clasificar en sistemas abiertos y cerrados. En los sistemas abiertos se bombea directamente el agua subterránea, cuya temperatura se mantiene constante a lo largo del año, con valores de entre 14 °C en zonas más frías y 17-19 °C en climas templados. El agua bombeada se puede usar directamente para climatizar espacios o pasar por una bomba de calor (Alcaraz y Vives, 2016). Los sistemas cerrados consisten en bombear un fluido por tubos cerrados, verticales u horizontales que intercambian calor con el terreno, comúnmente se utiliza una mezcla de agua con glicol (Lund et al, 2005), siendo el fluido más adecuado ya que es más eficiente y seguro para las instalaciones geotérmicas, garantizando el óptimo funcionamiento del sistema durante todo el año. Los colectores cerrados en configuración horizontal son los más sencillos de instalar, aunque requieren una superficie considerable que debe permanecer libre de edificaciones. Los sistemas en configuración vertical profundizan mucho más en el terreno, asegurando la estabilidad de la temperatura y evitando ser influenciada por cambios externos en la superficie (Pacheco, 2012).

En Uruguay, las experiencias de estudio en el uso de la geotermia somera se reducen a un único proyecto de tipo abierto, puesto en marcha en mayo de 2015 en el centro

educativo Los Pinos, del barrio Casavalle, ciudad de Montevideo (DEUMAN, 2020), y actualmente inactivo; y a varios proyectos residenciales privados de circuito cerrado.

Asimismo, existe un único antecedente en el país de estimación del potencial geotérmico de muy baja entalpía realizado para los alrededores de la ciudad de Salto (Noroeste de Uruguay), el cual arrojó un promedio de 84 W/m, para el caso de colectores verticales cerrados (Alcaraz et al, 2019).

En este trabajo se presenta el primer mapa del potencial geotérmico somero de Uruguay para el uso de colectores verticales cerrados, obtenido a partir de las cartas geológicas e hidrogeológicas disponibles para el país, y de lo establecido en la norma alemana VDI 4640-2 (Verein Deutscher Ingenieure, 2019) y modificaciones realizadas por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España (IDAE), en el año 2011.

Situación energética de Uruguay

Hasta el año 2000, Uruguay presentó una matriz energética primaria constituida en mayor medida por fuentes no renovables provenientes de hidrocarburos importados. La participación de energías renovables fue históricamente minoritaria, principalmente de origen hidroeléctrico, siendo la de mayor porte la represa de Salto Grande, en convenio binacional con la República Argentina. A comienzos del siglo XXI, Uruguay inició un proceso de diversificación de su matriz energética con la instalación de centrales de biomasa, que comenzaron a producir energía eléctrica. Más tarde se dio lugar a la producción eólica con la instalación de varios parques en distintos puntos del territorio, siendo en la actualidad la fuente renovable con mayor producción de electricidad en el país (Balance Energético Nacional, 2020).

La infraestructura energética actual está constituida por cuatro represas hidroeléctricas, centrales térmicas con turbinas de vapor, gas, y motores a base de combustibles fósiles y biomasa, importantes parques eólicos y solares de capitales públicos, privados y mixtos. El 60 % de la matriz energética primaria de Uruguay, que ha tenido un crecimiento neto del 150 % desde 1990 hasta 2022 (Figura 1), está representada por fuentes renovables entre las que destacan la biomasa, la eólica y la energía de origen hidroeléctrico, convirtiéndolo en un líder regional (Balance Energético Nacional, 2022). A su vez, tal como puede observarse, no existe participación de la energía geotérmica.

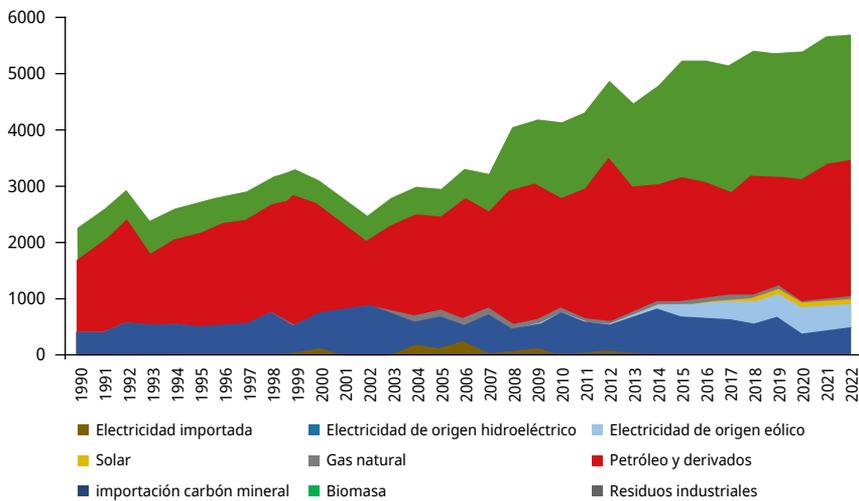


FIGURA 1. Evolución del abastecimiento de energía por tipo de fuente 1990-2022 (Balance Energético Nacional, 2022).

Los sectores de uso energético en Uruguay se han dividido históricamente en consumo residencial, transporte e industrial, siendo en su momento el sector residencial el de mayor demanda. Sin embargo, a partir de 1994 la estructura tomó otra dirección, cobrando mayor relevancia el sector del transporte. Más tarde sucedió lo mismo con el crecimiento de la industria a partir de 2008 (Balance Energético Nacional, 2022) (Figura 2).

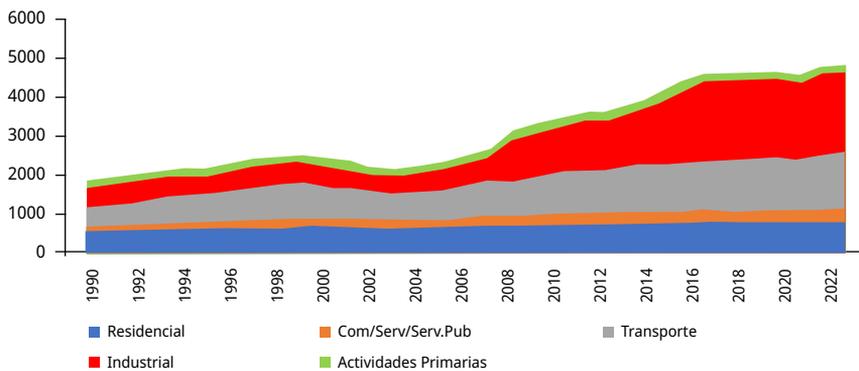


FIGURA 2. Evolución del consumo final de energía por sector 1990-2022 (Balance Energético Nacional, 2022).

El 18 % del consumo energético nacional del año 2022 correspondió al sector residencial (Balance Energético Nacional, 2022). En el año 2006 la Dirección Nacional de Energía elaboró el Balance Nacional de Energía Útil de Uruguay, el cual atribuyó a la calefacción el 32 % del consumo de energía del sector residencial (SEG, 2023) cuyas fuentes se presentan en la Figura 3. Se destaca el uso de la leña (muy arraigado a la idiosincrasia nacional), la energía eléctrica y el supergás; mientras que en menor proporción se utiliza gas por cañería y queroseno u otras fuentes (DEUMAN, 2020).

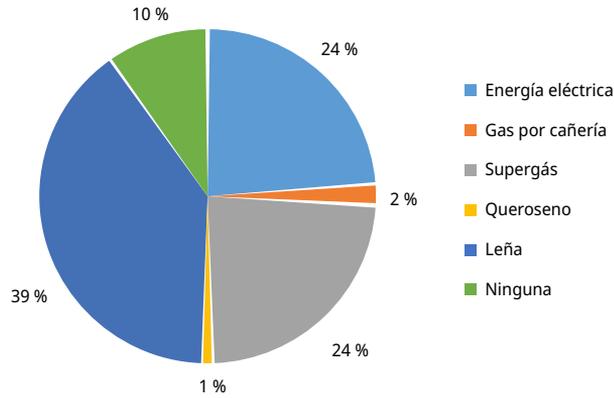


FIGURA 3. Fuentes de energía para la calefacción de viviendas (DEUMAN, 2020).

Contexto geológico

La geología de Uruguay, en su área continental, está constituida por un basamento cristalino de edad precámbrica y tres cuencas sedimentarias fanerozoicas, denominadas Norte, Santa Lucía y Laguna Merín (Figura 4).



FIGURA 4. Mapa geológico simplificado de Uruguay (modificado de Morales et al., 2021b).

El basamento cristalino ocupa aproximadamente el 44 % de la superficie del territorio nacional, aflorando principalmente al sur del Río Negro, y al norte, en las llamadas "islas cristalinas" de Cuñapirú-Vichadero (Rivera) y Aceguá (Cerro Largo). Está constituido por rocas metamórficas e ígneas, así como por diversos grupos de rocas hipoabisales.

Si bien su subdivisión en terrenos tectono-estatigráficos aún es motivo de debate; a nivel general puede ser dividido en: i) el Terreno Piedra Alta, el cual incluye rocas paleoproterozoicas no retrabajadas tectónicamente durante el Neoproterozoico (Oyhantçabal et al., 2011; Bossi y Ferrando, 2001), ii) el Terreno Nico Pérez, constituido por rocas arqueanas y paleoproterozoicas tectónicamente retrabajadas durante el Neoproterozoico (Oyhantçabal et al. 2011; Bossi y Ferrando, 2001), y iii) el Cinturón Dom Feliciano, el cual representa el ciclo orogénico Brasileño/Pan-African (Sánchez et al., 2010; Masquelin, 2006; Bossi y Gaucher, 2004).

Las rocas que constituyen el basamento cristalino están parcialmente recubiertas por grandes áreas de depósitos sedimentarios fanerozoicos. Al norte, se encuentran cubiertas por depósitos volcano-sedimentarios paleozoicos a cenozoicos que forman la denominada Cuenca Norte, correspondiente a la porción sur de la Cuenca Paraná, relacionados a la evolución de Gondwana Occidental. Al sur, están parcialmente cubiertas por depósitos volcano-sedimentarios pertenecientes al relleno de las cuencas extensionales (Santa Lucía y Laguna Merín), relacionadas a la apertura del océano Atlántico durante el Mesozoico.

La Cuenca Norte ha funcionado como una cuenca sedimentaria desde el punto de vista geológico (área subsidente de la corteza) desde el Paleozoico superior hasta finales del Mesozoico. Su relleno está constituido por un conjunto de rocas sedimentarias paleozoicas y mesozoicas e ígneas volcánicas mesozoicas, correspondientes a cuatro megasecuencias (Devónica, Carbonífero Superior-Pérmico, Jurásico-Cretácico y Cretácico Superior) y una delgada capa de rocas y sedimentos cenozoicos (Veroslavsky et al., 2022).

La Cuenca Santa Lucía presenta en la base una delgada capa de rocas ígneas extrusivas (basaltos), mientras que el relleno sedimentario está representado por rocas de origen continental, de edad Cretácico temprano y superior; y una delgada cobertura sedimentaria de edad cenozoica (Veroslavsky et al., 2004).

La Cuenca Laguna Merín, en casi toda su extensión, está cubierta por rocas y sedimentos cenozoicos, principalmente cuaternarios. Su relleno es fundamentalmente ígneo y de origen volcánico, con edades jurásicas y cretácicas, reunido en las formaciones Puerto Gómez y Arequita (Plenc, 2021).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este trabajo se utilizó la carta geológica de Uruguay a escala 1:500.000, elaborada por Preciozzi et al. (1985), y sucesivas actualizaciones. Allí, los autores distinguen 61 unidades litoestratigráficas aflorantes, con edades comprendidas entre el Arqueano y el reciente en todo el territorio nacional. Resulta pertinente mencionar que, si bien la nomenclatura y edad de alguna de estas unidades litoestratigráficas ha sufrido modificaciones en sucesivos trabajos académicos o técnicos, las descripciones litológicas (que en definitiva suponen la base de datos utilizada en este trabajo) se mantienen.

Por otra parte, se han utilizado las cartas geológicas correspondientes a los departamentos de Canelones (Spoturno et al., 2004a) y San José (Spoturno et al., 2004b) a escala 1:100.000 y la del departamento de Montevideo (Spoturno et al., 2004c) a escala 1:50.000. Estas son algunas de las cartas geológicas departamentales con las que se cuenta en la actualidad y que mejoran la descripción de las distintas unidades aflorantes en cada uno de esos departamentos. También se ha utilizado la carta hidrogeológica, elaborada por DINAMIGE y correspondiente al año 2003, con la finalidad de caracterizar hidráulicamente las distintas litologías.

Una vez identificadas las diferentes unidades litoestratigráficas se procedió a su clasificación en función a lo establecido por la norma alemana VDI 4640-2 (Verein Deutscher Ingenieure, 2019) y modificaciones realizadas por el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España, 2011; Tablas 1 y 2) para el caso de colectores cerrados verticales. Dicha norma se basa fundamentalmente en las propiedades térmicas típicas de las rocas (conductividad térmica del material) y extensas bases de datos, obtenidas a partir de experiencias que luego determinan los valores de capacidades de extracción de calor para cada una de ellas en términos de potencia por unidad de longitud de sonda (W/m). Las modificaciones realizadas a la norma alemana por el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España, 2011) se corresponden con adaptaciones climáticas y meteorológicas para el territorio español, cuya temperatura media anual oscila entre 14 °C y 19 °C, mientras que en territorio alemán ronda los 10.5 °C.

Suponiendo un suelo homogéneo con propiedades térmicas constantes, la temperatura a cualquier profundidad z puede estimarse a partir del siguiente modelo (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2012):

$$T(z, t) = T_m - A_s e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cos \left[\frac{2\pi}{365} \left(t - t_0 - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\alpha\pi}} \right) \right] \quad (1)$$

Donde $T(z, t)$ es la temperatura en °C del suelo en el tiempo t a una profundidad z , T_m es la temperatura media anual del suelo en °C tomada a una profundidad donde las variaciones de temperatura son despreciables, A_s es la oscilación de la temperatura en °C, que depende de la ubicación geográfica, el tipo de suelo y su saturación hídrica, t es el tiempo en días, t_0 es el desfase en días y α es la difusividad térmica del suelo en m²/día (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España, 2012).

Si bien la norma VDI 4640-2 (Verein Deutscher Ingenieure, 2019) describe el comportamiento térmico esperado en suelo alemán, las modificaciones realizadas por IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España, 2011) para suelo español se basan en el salto térmico existente entre la superficie en España y la temperatura del subsuelo a unos 10 m de profundidad (donde la temperatura se estabiliza), en comparación con el salto térmico existente entre el suelo alemán y la temperatura del subsuelo a 10 m de profundidad donde el mismo es menor. Este salto térmico, que es mayor para el caso de España, se traduce en una mayor extracción de calor (en invierno) o una mayor cesión de calor (en verano) dado que la cantidad de calor transferida de un cuerpo a otro por unidad de tiempo y unidad de área puede ser

expresada de forma matemática mediante la Ley de Fourier. Para el caso de análisis en una dimensión (x) se tiene:

$$Q_x = -k_x A \frac{dT}{dx} \quad (W) \quad (2)$$

En este trabajo se adoptó la modificación realizada por el instituto español dado que el territorio uruguayo presenta características similares al español en cuanto a temperaturas medias ambientales, siendo que en Uruguay la temperatura media anual registrada en 2020 osciló entre 16.6 °C y 19.6 °C (Instituto Nacional Uruguayo de Meteorología, 2022).

TABLA 1. Capacidad de extracción de calor de las rocas según la norma VDI 4640-2 (Verein Deutscher Ingenieure, 2019) (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España, 2011).

Tipo de roca (litologías)	Capacidad de extracción de calor (W/m)
Gravas y arenas secas	< 25
Arcillas y margas húmedas	35 - 50
Calizas y dolomías masivas	55 - 70
Areniscas	65 - 80
Granitos	68 - 85
Rocas básicas (basaltos)	40 - 65
Rocas metamórficas (gneis)	70 - 85
Gravas y arenas saturadas de agua	65 - 80
Gravas y arenas con gran circulación de agua	80 - 100

A su vez, se definen cinco categorías que agrupan los tipos de roca con capacidad de extracción de calor en rangos similares, relacionando la descripción litológica de las unidades litoestratigráficas a clasificar con el potencial térmico esperado según propiedades físico-térmicas e hidráulicas, estas últimas referidas a la presencia o no de humedad de los materiales que conforman cada unidad (Tabla 2).

TABLA 2. Grupos de litologías según características térmicas de la roca y potencial térmico correspondiente (modificado de Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España, 2011).

Grupo	Tipo de litología	Caracterización hidráulica	Potencial térmico superficial (W/m)
A	Arenas, gravas, arcillas y limos	Muy secos y nivel muy profundo (>30m)	< 25
B	Arcillas, arcillitas y limos y limolitas	Húmedos	30 - 50
C	Calizas, dolomías, basaltos, calcarenitas, metacalizas y metadolomías, metavolcánicas básicas, anfíbolitas	Húmedos	40 - 60
D	Gravas, arenas, areniscas, granitos rocas metamórficas (esquistos y gneises)	Húmedos. Nivel somero	60 - 80
E	Gravas, arenas y areniscas	Permeables, nivel somero y elevada saturación de agua	80 - 100

En el caso de aquellas unidades litoestratigráficas constituidas por más de un tipo de roca, para realizar la clasificación se consideraron las litologías más representativas o con mayores áreas de afloramiento. Ninguna de las unidades litoestratigráficas quedó clasificada en el grupo A (sedimentos clásicos muy secos y profundos), quedando todas las unidades litoestratigráficas clasificadas como pertenecientes a los grupos B, C, D y E. La clasificación de la totalidad de las unidades litoestratigráficas de Uruguay, según la nomenclatura de Preciozzi et al. (1985), se presenta en la Tabla 3.

Con todas las unidades litoestratigráficas clasificadas se procedió a la elaboración del mapa de potencial geotérmico somero, utilizando el programa informático QGIS (QGIS.org, 2022), el cual consiste en un sistema de información geográfica de código abierto. Con el mismo es posible acceder a base de datos, trabajar con datos de tipo vectorial o ráster y contribuir con su uso en aspectos referentes a detección y corrección de errores, generación de nuevos códigos y soporte a otros usuarios.

El mapa elaborado toma como base la carta geológica de Uruguay (Preciozzi et al., 1985), en archivo shape, el cual fue cargado en el programa QGIS (QGIS.org, 2022), permitiendo visualizar los límites de las 61 unidades mencionadas con sus respectivas referencias. Se trata además de un mapa georreferenciado que permite añadir nueva información mediante el uso de coordenadas geográficas o utilizando otros programas con referencias geográficas que puedan aportar información.

Se procedieron a identificar los distintos tipos de unidades (Figura 5) según la clasificación presentada en la Tabla 2 y sobre ellas se crearon capas vectoriales de tipo poligonal para delimitar los distintos grupos en los que el territorio queda dividido.

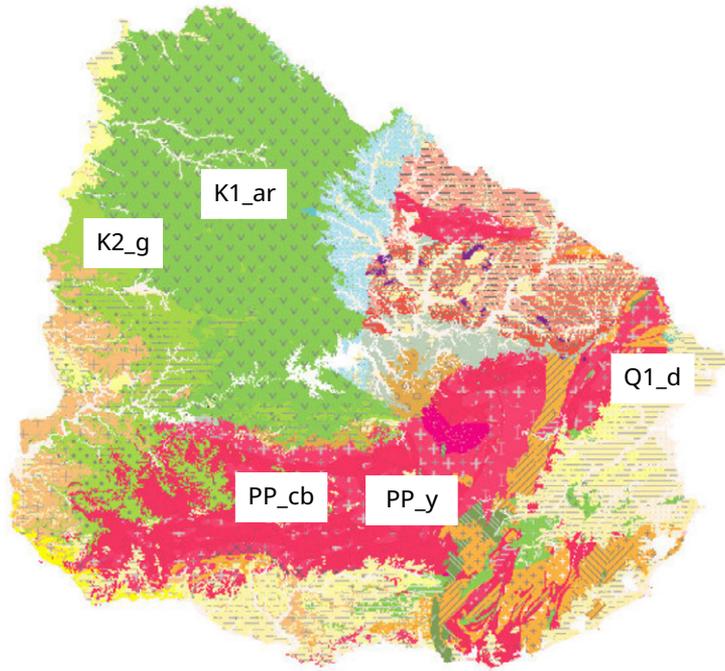


FIGURA 5. Unidades geológicas cargadas en programa QGIS en escala 1:500.000 (tomado de Preciozzi et al, 1985).

TABLA 3. Clasificación de las unidades litológicas presentes en la carta geológica de Uruguay (Preciozzi, 1985).

Código	Nombre de la unidad	Composición	Parámetro térmico
1	Cataclastitas y milonitas	Rocas metamórficas	D
2	Metavulcanitas de Ojosmín	Granitos	D
3	Unidad Berrondo	Granitos	C
4	Zócalo de las Islas Cristalina de Rivera	Granitos	D
5	Rivera	Rocas metamórficas	D
6	Granitos indiferenciados	Granitos	D
7	Complejo Basal	Rocas metamórficas	D
8	Formación Pavas	Rocas metamórficas	D
9	Formación Valentines	Rocas metamórficas	D
10	Formación Montevideo	Rocas metamórficas	D
11	Formación San José	Rocas metamórficas	D
12	Formación Arroyo Grande	Rocas metamórficas	D

Código	Nombre de la unidad	Composición	Parámetro térmico
13	Formaciones Paso Severino - Cerros de San Juan	Calizas y dolomías	D
14	Granitoides tardipostectónicos	Granitos	D
15	Granitos Sintectónicos e Indiferenciados	Granitos	D
16	Rocas metamórficas de naturaleza variada	Rocas metamórficas	D
17	Formación Paso del Dragón	Rocas metamórficas	D
18	Secuencia de metamorfismo medio	Rocas metamórficas	D
19	Secuencia de metamorfismo medio	Rocas metamórficas	D
20	Secuencia volcano sedimentaria	Rocas metamórficas	D
21	Formación Sierra Ballena	Rocas metamórficas	D
22	Grupo Barriga Negra	Arcillas	C
23	Granitoides tardipostectónicos	Granitos	D
24	Formación Sierra de los Ríos	Rocas ígneas	D
25	Formación Sierra de las Ánimas	Rocas ígneas plutónicas	D
26	Formación Piedras de Afilar	Areniscas	D
27	Formación Cerrezuelo	Areniscas	D
28	Formación Cordobés	Areniscas/Arcillas	B
29	Formación La Paloma	Areniscas	D
30	Formación San Gregorio	Areniscas	D
31	Formación Tres Islas	Areniscas	E
32	Pérmico Medio Indiferenciado	Areniscas	D
33	Formación Fraile Muerto	Areniscas	B
34	Formaciones Paso Aguilar y Mangrullo	Areniscas	B
35	Formación Yaguarí	Areniscas	B
36	Basaltos mezozoicos indiferenciados	Rocas ígneas	C
37	Formación Cuaró	Rocas ígneas	C
38	Formación Tacuarembó	Areniscas	E
39	Formación Puerto Gómez	Rocas básicas (basalto)	C
40	Formación Arapey	Rocas básicas (basalto)	C
41	Conglomerado de la California	Arcillas y margas húm.	D
42	Formación Valle Chico	Granitos (muy similar)	D

Código	Nombre de la unidad	Composición	Parámetro térmico
43	Formación Arequita	Granitos (muy similar)	D
44	Formación Migues	Areniscas	D
45	Cretácico Superior indiferenciado	Areniscas	D
46	Formación Guichón	Areniscas	D
47	Formación Mercedes	Areniscas	D
48	Formación Asencio	Areniscas	D
49	Formación Fray Bentos	Areniscas	B
50	Formación Camacho	Areniscas	B
51	Formación Paso del Puerto	Areniscas	D
52	Formación Salto	Areniscas	E
53	Formación Raigón	Areniscas	E
54	Arenas indiferenciadas	Areniscas	D
55	Formación Las Arenas	Areniscas	D
56	Formación Chuy	Arcillas y margas húmedas	D
57	Formación Libertad	Areniscas-arcillas	B
58	Formación Dolores	Areniscas	B
59	Formación Villa Soriano	Areniscas	B
60	Sedimentación mixta a predominancia continental	Areniscas	D
61	Actual	Arcillas	B

RESULTADOS

Dada la complejidad de los procesos de transferencia de calor que intervienen a nivel somero, sumado a un gran número de variables que intervienen a la hora de diseñar una instalación geotérmica a este nivel, se cree conveniente la realización de varios *test* de respuesta térmica a fin de corroborar los resultados del mapa. En el caso de que se utilice este recurso se aconseja utilizar la Tabla 4 para estimar el potencial por unidad de longitud para sondas verticales cerradas.

TABLA 4. Extracción térmica esperada según conductividad (modificada de VDI 4640-2) (Verein Deutscher Ingenieure, 2019).

Tipo de suelo - Valores generales	Potencial (W/m)
Inapropiado. Sedimento seco $k < 1,5 \text{ W/mK}$	20 - 25
Normal. Roca consolidada. Sedimento saturado de agua. $1,5 \text{ W/mK} < k < 3,0 \text{ W/mK}$	50 - 60
Roca consolidada. Elevada conductividad térmica. $k > 3,0 \text{ W/mK}$	70 - 84

La Figura 6 presenta el mapa de potencial geotérmico de muy baja entalpía, temperatura o somero de Uruguay.

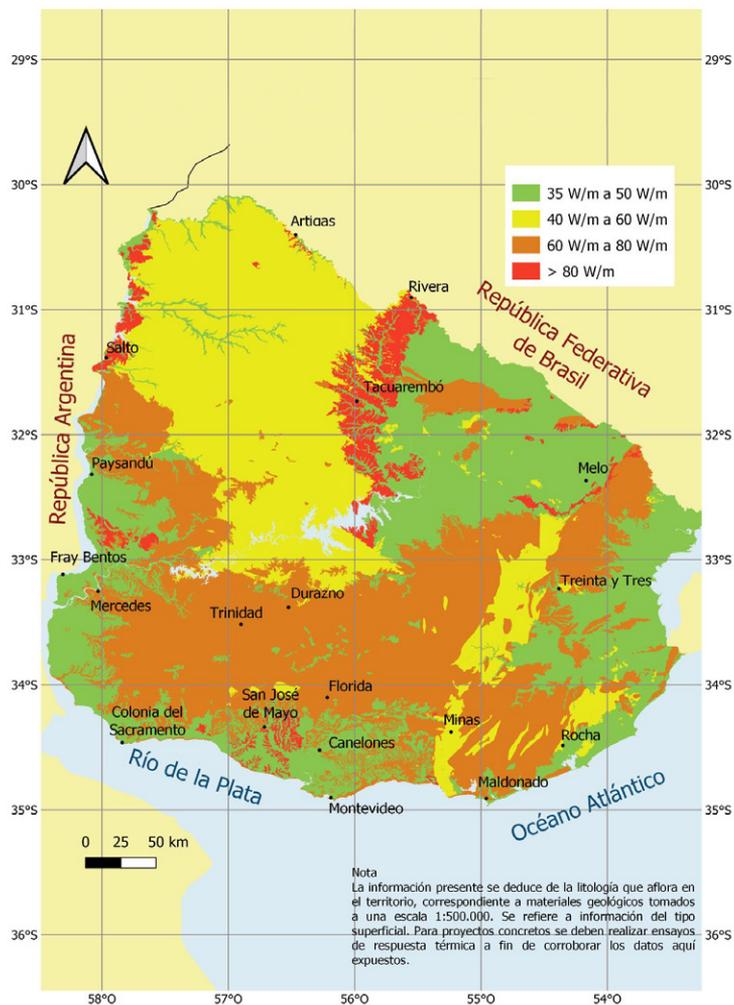


FIGURA 6. Mapa de potencial geotérmico de muy baja entalpía de Uruguay, referido según el potencial de extracción de calor en W/m (elaboración propia).

Las unidades geológicas del basamento cristalino presentan un potencial de extracción de calor de las rocas de entre 60 y 80 W/m con excepción de las áreas con predominio de secuencias metamórficas con protolito calcáreo y/o de rocas básicas, las cuales se ubican principalmente en la región Este correspondiente al cinturón Dom Feliciano. En esos casos, las rocas del basamento cristalino presentan un potencial de extracción de calor menor, entre 40 y 60 W/m.

La Cuenca Norte presenta un potencial de extracción de calor que se incrementa de Este a Oeste, en virtud del predominio de rocas sedimentarias clásticas finas al Este (unidades estratigráficas llamadas informalmente pelíticas grises), rocas ígneas básicas (basaltos de la Formación Arapey) en el sector central, y areniscas y conglomerados del Cretácico Superior al Oeste. Esta situación se ve alterada con la presencia de unidades sedimentarias con importante saturación de agua como la Formación Tacuarembó (parte integrante del Sistema Acuífero Guaraní; LEBAC, 2008), aflorante en una faja de dirección Norte-Sur en la región central de la Cuenca Norte y la Formación Salto, ubicada en los alrededores de la ciudad homónima, sobre el margen del río Uruguay.

Las áreas del país con importante cobertura sedimentaria cenozoica (cuencas Santa Lucía y Laguna Merín y litoral oeste) presentan un potencial de extracción de calor relativamente bajo, entre 35 y 50 W/m. Esto se debe a la predominancia de sedimentos o rocas sedimentarias clásticas de tamaño de grano fino (principalmente limolitas y arcillitas). Nuevamente, las unidades sedimentarias que constituyen acuíferos importantes, como es el caso del acuífero Raigón (al Sur, departamento de San José), presentan un potencial mayor, superior a 80 W/m.

En la metodología utilizada en este trabajo, para la región geográfica de los alrededores de la ciudad de Salto se indica un potencial de extracción de calor superior a 80 W/m. Esto es importante mencionar debido a que los resultados son consistentes con el único antecedente de estimación del potencial geotérmico somero en Uruguay, realizado en la misma región, el cual ha arrojado un promedio de 84 W/m, utilizando una metodología basada en el álgebra de mapas, donde el potencial y sus impactos térmicos se estiman con base en parámetros científicos y técnicos, entre ellos, la velocidad del agua subterránea, la conductividad hidráulica y las propiedades térmicas de los acuíferos según su litología. También se requieren factores adicionales basados en decisiones de gestión para limitar la explotación energética, definiendo el comportamiento térmico del acuífero (Alcaraz et al, 2019).

La demanda energética para climatización en una casa se estima a razón de 100 W cada metro cuadrado a climatizar. Una casa tipo, con tres dormitorios, se estima en 90-120 metros cuadrados. Si se desea climatizar una vivienda con una demanda energética de 15 kW mediante una instalación geotérmica con captadores verticales cerrados, y se utilizará una bomba de calor con un COP de 4. Además, considerando que la ubicación geográfica correspondiente, como los alrededores de la ciudad de Montevideo, presenta un potencial geotérmico somero de 50 W/m, se procede a calcular el número de captadores necesarios calculando la potencia térmica que debe ceder el terreno, la cual

se obtiene como la diferencia entre la potencia térmica necesaria para cubrir la demanda y la potencia eléctrica consumida por la bomba de calor.

$$POT_{\text{terreno}} = Demanda - \frac{Demanda}{COP} \quad (3)$$

$$L_{\text{sonda}} = \frac{POT_{\text{terreno}}}{Potencial\ geotérmico\ somero\ por\ metro\ de\ sonda} \quad (4)$$

Para el caso planteado, la potencia térmica esperada de cesión del suelo es de 11,25 kW, equivalente a 11250 W. Y para las características térmicas del terreno cuyo potencial geotérmico somero estimado es aproximadamente 50 W/m, se necesitan 225 m de captadores verticales que podrían traducirse en 3 sondas de 80 m.

CONCLUSIONES

Uruguay presenta un potencial de extracción de calor medio a alto (superior a 40 - 60 W/m) en más del 60 % de su territorio. Ese potencial de energía geotérmica somera podría utilizarse tanto para climatizar edificios como para proporcionar soluciones térmicas a varias de las actividades que se desarrollan en el país (actividad forestal, papeleras, cultivos de cereales, lechería, entre otros) o fomentar el desarrollo de nuevas actividades productivas por tratarse de una energía continua, eficiente y ambientalmente amigable. Además, considerando que el uso directo de energía geotérmica somera se destina principalmente a la climatización de edificaciones, y dado el porcentaje significativo de la matriz energética nacional dedicado a la calefacción de viviendas, la energía geotérmica somera tiene el potencial de convertirse en un actor clave para el desarrollo energético del país.

Las áreas de basamento cristalino presentan un potencial superior a 60 W/m en casi toda su extensión, pero pueden presentar como dificultad los altos costos de perforación en las litologías que lo conforman. Las áreas de cuenca, particularmente en la Cuenca Norte, donde ocurren unidades aflorantes constituidas por litologías clásticas de tamaño de grano medio a medio-grueso, saturadas en agua, representando acuíferos ubicados a escasa profundidad tales como la Formación Tacuarembó o la Formación Salto, representan las áreas con potencial mayor y con menores costos de perforación.

Las áreas de menor potencial se corresponden con los afloramientos de unidades sedimentarias clásticas de tamaño de grano fino, que constituyen gran parte de la cobertura sedimentaria cenozoica de las cuencas Santa Lucía, Laguna Merín y la región litoral oeste del país, como así también las litologías aflorantes al Este de la Cuenca Norte.

El potencial estimado en este trabajo es teórico, por lo que la elaboración de proyectos concretos en el país requerirá la realización de estudios pertinentes *in situ* para ratificar que el potencial del lugar se encuentre en el rango establecido. Asimismo, dada la complejidad de los procesos de transferencia de calor que intervienen a nivel somero, sumado a un gran

número de variables que intervienen a la hora de diseñar una instalación geotérmica, se sugiere realizar *test* de respuesta térmica para ratificar los resultados.

REFERENCIAS

- Alcaraz, M. y Vives, L., 2016. *Geotermia somera: una energía renovable al alcance de todos* [En línea]. Buenos Aires [Consulta: 06 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www.unicen.edu.ar/content/geotermia-somera-una-energ%C3%ADa-renovable-al-alcance-de-todos>
- Alcaraz, M.; Vázquez, E.; Pleitavino, M.; Sheiber, L.; River, D.; Villacreses, G.; Aravena, D.; Moreno, D.; Pedro, A.; Samaniego, L.; Ramos, A.; Carro, M.; Morillón, D.; Blessent, D.; Daniele, L.; Ramos, J. y Macías, J., 2019. *Ibero-American atlas of shallow geothermal energy by RIGS-CYTED*. San Francisco: AGU Meeting Fall.
- Balance energético nacional, 2020. Uruguay. Ministerio de Industria y Energía y Minería. Dirección Nacional de Energía. Montevideo. ISSN: 2730-5295.
- Balance energético nacional, 2022. Uruguay. Ministerio de Industria y Energía y Minería. Dirección Nacional de Energía. Montevideo. ISSN: 2730-5295.
- Bossi J. y Ferrando L., 2001. *Carta geológica del Uruguay escala 1/500.000. Versión digital*. Montevideo: Facultad de Agronomía.
- Bossi, J. y Gaucher, C., 2004. The Cuchilla Dionisio Terrane, Uruguay: An Allochthonous Block Accreted in the Cambrian to SW-Gondwana. En. *Gondwana Research*, 7(3), pp. 661-674. ISSN: 1342-937X.
- DEUMAN, 2020. *Elaboración de una hoja de ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial*. [En línea]. [Consulta: 29 de mayo de 2022]. Disponible en: https://www.ctc-n.org/system/files/dossier/3b/E3.1_Escenario%20actual%20de%20la%20energ%C3%ADa%20geot%C3%A9rmica.pdf
- García, A.; Garrido, E. y Mejías, M., 2020. *Geotermia somera: fundamentos teóricos y aplicación*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. ISBN: 9788491381051.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2011. *Evaluación del potencial de energía geotérmica*. [En línea]. Madrid [Consulta: 31 de mayo 2022]. Disponible en: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e9_geotermia_A_db72b0ac.pdf
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2012. *Guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado*. [En línea]. Madrid. ISBN: 978-84-96680-60-9. Disponible en: https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_14_guia_tecnica_diseno_de_sistemas_de_intercambio_geotermico_de_circuito_cerrado_1a7cff37.pdf
- Instituto Nacional Uruguayo de Meteorología, 2022. *Estadísticas climatológicas: Tablas estadísticas*. [En línea]. Montevideo [Consulta: 1 de junio 2022]. Disponible en: <https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/tablas-estadisticas>.
- LEBAC, 2008. *Informe Final de Hidrogeología do Projeto Aquífero Guarani*. Coord.: Gastmans, D. y Chang, H.K. Equipe: Paula e Silva, F., Correa, S.F., Informe Técnico – Consórcio Guarani. Rio Claro.

- Lund, J.; Freeston, D. y Boyd, T., 2005. Direct application of geothermal energy: 2005 Worldwide review. En: *Geothermics*, 34, pp. 691-727.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2005.09.003>.
- Masquelin, H., 2006. El escudo uruguayo. En: *Cuencas Sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales. Paleozoico*. Montevideo: DIRAC pp. 37-106.
- Morales, E.; Pedro, A. y De León, R., 2020. Geothermal gradients and heat flow in North Basin of Uruguay. En: *International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics*, 3(1), pp. 20-25. DOI: <https://doi.org/10.31214/ijthfa.v3i1.43>
- Morales, E.; Veroslavsky, G.; Manganelli, A.; Marmisolle, J.; Pedro, A.; Samaniego, L.; Plenc, F.; Umpiérrez, R.; Ferreira, M. y Morales Demarco, M., 2021b. Potential of geothermal energy in the onshore sedimentary basins of Uruguay. En: *Geothermics*. 95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102165>
- Oyhantçabal, P.; Siegesmund, S. y Wemmer, K., eds., 2011. The Río de la Plata Craton: a review of units, boundaries, ages and isotopic signature [En línea], En: *Int. J. Earth. Sci.* [Consulta: 17 de mayo de 2022] DOI: <https://doi.org/10.1007/s00531-010-0580-8>
- Pacheco, A., 2012. *Aprovechamiento del recurso geotérmico a través de las cimentaciones y otras estructuras*. [En línea]. Universidad Politécnica de Catalunya. [Consulta: 17 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/41808248.pdf>
- Plenc Nobre, F., 2021. *Análisis magnetotelúrico de la cuenca Laguna Merín (SE, Uruguay)*. Tesis de grado. Universidad de la República. Uruguay.
- Preciozzi, F.; Sportuno, J.; Heinzen, W. y Rossi P., 1985. *Carta geológica del Uruguay a escala 1:500.000* [En línea]. Montevideo: Uruguay. Ministerio de Industria y Energía. Dirección Nacional de Minería y Geología, [Consulta: 20 de diciembre de 2021].
Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/publicaciones/Mapa%20Geol%C3%B3gico%20del%20Uruguay.pdf>
- QGIS, 2022. *QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project*. Vers. 3.22. Bialowieza: QGIS. Disponible en: <http://qgis.org>
- Sánchez Bettucci L; Peel E. y Masquelin E., 2010. Neoproterozoic tectonic synthesis of Uruguay. En: *International Geology Review*, 52 pp. 51–78.
- Santoyo, E. y Barragán-Reyes, R., 2010. Energía geotérmica. En: *Ciencia*. 61, pp. 40-51.
DOI: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61_2/PDF/EnergiaGeotermica.pdf
- SEG, 2023. *Indicadores energéticos*. Montevideo. [Consulta: 30 de Mayo de 2023].
Disponible en: https://www.segingenieria.com/wp-content/uploads/2023/05/Indicadores-Energéticos_2304.pdf
- Spoturno, J.; Oyhantçabal, P.; Goso, C.; Cazaux, S.; Aubet, N.; Huelmo, S.; Morales, E.; Piñeiro, A. y Martínez, G., 2004a. *Mapa geológico del departamento de Canelones a escala 1:100.000*. Uruguay. Ministerio de Industria y Energía. Dirección Nacional de Minería y Geología.
- Spoturno, J.; Oyhantçabal, P.; Aubet, N.; Cazaux, S.; Morales, E. y Loureiro, J., 2004b. *Mapa geológico del departamento de San José a escala 1:100.000*. Uruguay. Ministerio de Industria y Energía. Dirección Nacional de Minería y Geología.
- Spoturno, J.; Oyhantçabal, P.; Goso, C.; Aubet, N.; Cazaux, S.; Huelmo, S.; Techera, J.; Arrighetti R.; Morales, E.; Martínez, G.; y Gianotti, V., 2004c. *Mapa geológico del*

- departamento de Montevideo a escala 1:50.000*. Uruguay. Ministerio de Industria y Energía. Dirección Nacional de Minería y Geología.
- Verein Deutscher Ingenieure, 2019. VDI 4640-2: *Thermal use of the underground – Ground source heat pump systems*. Berlin: VDI.
- Veroslavsky, G.; De Santa Ana, H. y Rossello, E., 2004. Depósitos del Jurásico y Cretácico Temprano de la región meridional de Uruguay. El lineamiento Santa Lucía–Aiguá–Merín. En: *Cuencas Sedimentarias del Uruguay-Mesozoico*. pp. 117-142.
- Veroslavsky, G.; Manganelli, A.; Aubet, N.; Pochintesta, L. y Pedro, A., 2022. Geología del área aflorante del Sistema Acuífero guaraní, Cuenca Norte. Montevideo. [en línea] En: *XXI Congreso Geológico Argentino “Geología y desarrollo, desafíos del siglo XXI”* Puerto Madryn - Argentina, 14-18 de marzo.

Análisis de la variabilidad del error de masa convencional en la calibración de pesas de 5 kg, 10 kg y 20 kg con arreglos de 1 kg

Analysis of the variability of conventional mass error in the calibration of 5 kg, 10 kg and 20 kg weights with 1 kg arrays

Análise da variabilidade do erro da massa convencional na calibração de pesos de 5 kg, 10 kg e 20 kg com matrizes de 1 kg

 KATHERINE QUEZADA (1)

 DIMAS GRACIA (1)

 ABDIEL LÓPEZ (1)

 JOSÉ DÍAZ (1)

 ANÍBAL CANDELARIA (1)

 EDWIN AIZPURUA (1)

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

RECIBIDO: 22/10/2024 → APROBADO: 25/11/2024  kquezada@cenamep.org.pa

RESUMEN

En este estudio se evaluaron las desviaciones típicas y gráficas de error obtenidas de la medición de cinco metrólogos al utilizar distintos arreglos de calibración en valores nominales de 5 kg, 10 kg y 20 kg de clase F_1 , haciendo uso de masas de 1 kg de clase E_2 . Se realizaron dos arreglos para 5 kg y tres arreglos para 10 kg y 20 kg. A través de matrices de índice de compatibilidad, se llevó a cabo un estudio de reproducibilidad para los distintos arreglos con los respectivos valores nominales. Los resultados evidenciaron que para la pesa de 5 kg el arreglo 1 demostró ser el más efectivo, mostrando una desviación típica menor en comparación con el arreglo 2, lo que sugiere menor variabilidad entre los metrólogos. Para la pesa de 10 kg, el arreglo 3 presentó la desviación típica más baja, destacándose como la opción más reproducible. En las calibraciones de 20 kg, el arreglo 2 fue identificado como el más recomendado, presentando una menor desviación típica en comparación con los arreglos 1 y 3. Estos hallazgos resaltan la importancia de elegir el arreglo de pesas más adecuado para calibraciones en este alcance. De esa manera, se puede asegurar la reproducibilidad en este tipo de mediciones, asegurando la calidad y fiabilidad del método de medición empleado.

Palabras clave: calibración de pesas, desviación típica, índices de compatibilidad, metrología, reproducibilidad.

ABSTRACT

In this study, the standard deviations and error plots obtained from the measurement of five metrologists using different calibration arrays at nominal values of 5 kg, 10 kg and 20 kg of class F_1 using 1 kg masses of class E_2 were evaluated. Two arrays for 5 kg and three arrays for 10 kg and 20 kg were performed. Through compatibility index matrices, a reproducibility study was carried out for the different arrays with the respective nominal values. The results showed that, for the 5 kg weight, array 1 proved to be the most effective, showing a lower standard deviation compared to array 2, suggesting less variability among metrologists. For the 10 kg weight, array 3 presented the lowest standard deviation, standing out as the most reproducible option. For the 20 kg calibrations, arrangement 2 was identified as the most recommended, presenting a lower standard deviation compared to arrangements 1 and 3. These findings highlight the importance of choosing the most appropriate weight arrangement for this type of calibration in this scope. In this way, reproducibility can be ensured in this type of measurement, assuring the quality and reliability of the measurement method used.

Keywords: weight calibration, standard deviation, compatibility indices, metrology, reproducibility.

RESUMO

Neste estudo, foram avaliados os desvios-padrão e os gráficos de erro obtidos a partir das medições de cinco metrologistas utilizando diferentes matrizes de calibração com valores nominais de 5 kg, 10 kg e 20 kg da classe F_1 , usando massas de 1 kg da classe E_2 . Foram efetuadas duas matrizes para 5 kg e três matrizes para 10 kg e 20 kg. Através de matrizes de índice de compatibilidade, foi efetuado um estudo de reprodutibilidade para as diferentes matrizes com os respectivos valores nominais. Os resultados mostraram que, para o peso de 5 kg, a matriz 1 revelou-se a mais eficaz, apresentando um desvio padrão inferior ao da matriz 2, o que sugere uma menor variabilidade entre metrologistas. Para o peso de 10 kg, a disposição 3 apresentou o menor desvio-padrão, destacando-se como a opção mais reprodutível. Para as calibrações de 20 kg, a disposição 2 foi identificada como a mais recomendada, apresentando um menor desvio-padrão em comparação com as disposições 1 e 3. Estes resultados realçam a importância de escolher a disposição de pesos mais adequada para este tipo de calibração neste âmbito. Desta forma, é possível assegurar a reprodutibilidade neste tipo de medição, garantindo a qualidade e fiabilidade do método de medição utilizado.

Palavras-chave: calibração de pesos, desvio padrão, índices de compatibilidade, metrologia, reprodutibilidade.

INTRODUCCIÓN

La determinación de los valores de masa de las pesas mediante las calibraciones es de gran importancia en la sociedad actual, debido a su aplicabilidad en actividades tanto de

investigación como industriales. Por esta razón, surge la necesidad de conocer la masa de manera cuantitativa, incrementado el uso de patrones, instrumentos y metodologías para determinarla (Chinchilla et al., 2001; Talavera y Pezet, 2002; Rocío y Pellecer, 2020).

El concepto "Capacidad de Medición y Calibración (CMC)" hace referencia a la confiabilidad de las mediciones y su dependencia de diferentes factores, entre ellos, el método de medición o calibración utilizado. El Centro Nacional de Metrología de Panamá (CENAMEP AIP, una asociación de interés público) cuenta con 20 CMC en la magnitud de masa, las cuales están registradas en la base de datos KCDB del Bureau Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) (s.d.), para la calibración de pesas clase F_1 desde 1 mg a 2 kg, según sus incertidumbres declaradas (Centro Nacional de Metrología de Panamá, s.d.).

La clasificación de las pesas, de acuerdo con la Recomendación Internacional R 111-1 de la Organización Internacional de Metrología Legal (2004b), se basa en sus clases de exactitud: E_1 , E_2 , F_1 , F_2 , M_1 , M_{1-2} , M_2 , M_{2-3} y M_3 , siendo E_1 la clase de mayor exactitud y M_3 la de menor exactitud. El método de calibración de pesas utilizado en el CENAMEP AIP se conoce como "doble sustitución", también llamado método ABBA, y consiste en comparar la pesa bajo calibración con una o más pesas de referencia, asegurando que las cargas sean de igual valor nominal. Es fundamental que los errores máximos permisibles (EMP) de la pesa de referencia no superen un tercio del EMP de la pesa bajo calibración. El centro cuenta con pesas de clase F_1 para los valores nominales de 5 kg, 10 kg y 20 kg. Sin embargo, para calibrar estos valores nominales se utiliza un conjunto de pesas de 1 kg de clase E_2 . Dado que el centro no dispone de pesas sólidas de clase E_2 para los valores nominales de 5, 10 y 20 kg de clase F_1 , se utiliza un conjunto de pesas de 1 kg de clase E_2 para realizar la comparación.

Además, en las calibraciones se presenta un parámetro conocido como incertidumbre de medida, la cual se puede definir como la duda cuantificable de una medición. En la calibración de pesas, las incertidumbres a considerar están relacionadas a diversos factores, como las características del instrumento de pesaje utilizado (comparador de masa), las propiedades del patrón y de la pesa a calibrar. Estas incertidumbres se expresan en la Ecuación 1 (Organización Internacional de Metrología Legal (OIML), 2004a; Centro Español de Metrología, 2008; Moroto et al., s.d., pp. 4-6), de la siguiente manera:

$$u^2(m_{ct}) = u^2(m_{cp}) + u^2(\delta m_{cr}) + (m_{cp} + \delta m_{cr})^2 \cdot u^2(C) + u^2(\overline{\Delta I}) + u^2(\delta d) + u^2(\delta e) \quad (1)$$

Donde:

m_{ct} : es la masa convencional de la incógnita.

m_{cp} : es la masa convencional del patrón.

δm_{cr} : deriva de la masa convencional de la referencia.

C : es la corrección por empuje del aire.

$\overline{\Delta I}$: es la media de la diferencia de indicación.

δd : es la resolución del comparador de masa.

δe : es el error de excentricidad del comparador.

En este sentido, la excentricidad del comparador se considera despreciable si la muestra y el patrón son situados en el centro del dispositivo receptor de carga. Además,

la sensibilidad del comparador se evalúa mediante la prueba de sensibilidad, que permite determinar su capacidad para detectar variaciones mínimas de carga (Centro Español de Metrología, 2020, p. 10).

Por otro lado, la evaluación de la incertidumbre se clasifica en dos tipos: tipo A y tipo B. La incertidumbre tipo A corresponde a la evaluación de una componente de la incertidumbre de medida mediante un análisis estadístico de los valores obtenidos bajo condiciones de medición definidas, y puede ser utilizada para condiciones de reproducibilidad tal como se muestra en la Ecuación 2.

$$u(q) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n s(q_k) \quad (2)$$

Donde:

$s(q_k)$: es la desviación estándar, obtenida a partir de la Ecuación 3.

$$s(q_k) = \frac{\sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})}{\sqrt{n-1}} \quad (3)$$

n : es el número total de mediciones realizadas.

En contraste, la evaluación tipo B aborda la incertidumbre de medida de manera distinta. Esta evaluación se basa en información asociada a valores publicados y reconocidos como el valor de un material de referencia certificado, datos obtenidos de un certificado de calibración, información sobre la deriva, y datos relacionados con la clase de exactitud de un instrumento de medida verificado, así como límites establecidos a partir de la experiencia del personal (Centro Español de Metrología, 2012, p. 35).

De acuerdo con el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM), elaborado por el Centro Español de Metrología (2012), las condiciones de reproducibilidad de una medición incluyen diferentes lugares, operadores, sistemas de medida y mediciones repetidas de los mismos objetos u objetos similares. La reproducibilidad se define como el grado de concordancia entre los resultados de las mediciones del mismo mensurando realizadas bajo diferentes condiciones, tal como lo describe la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medidas del Centro Español de Metrología (2008) y Díaz (2018, p. 12).

Además, Becerra (2003) indica que una forma de evaluar la reproducibilidad entre diferentes miembros del personal técnico es mediante el uso del error normalizado, tal como se presenta en la Ecuación 4:

$$E_n = \frac{X_2 - X_1}{\sqrt{U_2^2 + U_1^2}} \quad (4)$$

A partir de esta ecuación, es posible calcular los índices de compatibilidad. El índice de compatibilidad, o grado de equivalencia, se define como la diferencia entre los valores declarados por los participantes, considerando la incertidumbre expandida de esa

diferencia. Para que los resultados se consideren compatibles, esta diferencia debe ser menor que la incertidumbre correspondiente (Luján, Pezet y Becerra, 2006).

Esta investigación tuvo como objetivo analizar el efecto de la variabilidad del error de masa convencional en arreglos de pesas patrón de 1 kg clase E₂, en calibraciones de 5 kg, 10 kg y 20 kg de clase F₁, enfocándose en la reproducibilidad de los resultados entre diferentes metrólogos. La importancia de este tipo de estudio radica en establecer un método uniforme de trabajo para el laboratorio, independientemente del metrólogo que realice las mediciones, a fin de contribuir a reducir posibles errores sistemáticos asociados con cambios en los arreglos de las pesas de 1 kg.

Este estudio toma relevancia en el ámbito de las calibraciones de 1 kg para el área científica y la industria, permitiendo a los profesionales del sector identificar la manera más eficiente de realizar calibraciones con este tipo de arreglos y hacer uso de un sistema de medición más confiable.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sobre el protocolo de la comparación

Seis metrólogos del Laboratorio Secundario de Masas de la Coordinación de Magnitudes Mecánicas del CENAMEP AIP fueron los encargados de determinar los parámetros iniciales del estudio, como los alcances a estudiar, la técnica de calibración a utilizar, los arreglos a ejecutar, los patrones, las incógnitas y los comparadores de masa. Durante la toma de datos participaron cinco metrólogos con diferentes años de experiencia en esta magnitud; cada uno estuvo directamente involucrado en la parte experimental del estudio y en la redacción de este artículo. El sexto metrólogo asumió la responsabilidad de llevar el control y seguimiento de todo el proceso de calibración, asegurando que se siguiera el procedimiento establecido para el desarrollo del estudio. Además, al finalizar la toma de datos, el sexto metrólogo fue el encargado del análisis estadístico y la creación de gráficos que facilitaron la interpretación y visualización de los resultados.

Este estudio de metrología fue de corte transversal; se inició el 2 de febrero de 2024 y la toma de datos finalizó el 22 de marzo del mismo año. De acuerdo con el procedimiento interno del laboratorio, es fundamental mantener condiciones ambientales estables; en este caso, se establecieron rangos de temperatura entre 18 °C y 27 °C y de humedad entre 40 % y 60 %. Durante el estudio, las condiciones se mantuvieron dentro de estos parámetros, con temperaturas entre 18 °C y 22 °C y humedad entre 43 % y 52 %, cumpliendo así con los límites establecidos.

Los metrólogos participantes presentan distintos niveles de experiencia: uno cuenta con 8 años, otro con 6 años, uno más con 2 años y tres tienen 1 año de experiencia. Esta diversidad en la experiencia de los metrólogos aporta un valor significativo al estudio, ya que permite analizar cómo los diferentes arreglos influyen en las mediciones, sin que el tiempo de experiencia sea un factor determinante, sino centrándose en la técnica establecida.

Patrones y equipos utilizados

Se evaluaron los equipos actualmente en uso en el laboratorio. Posteriormente, se realizaron los respectivos arreglos de pesas de 1 kg con clase de exactitud E_2 en diferentes alcances. Las pesas identificadas se clasifican de acuerdo con los códigos asignados por el centro, en cumplimiento con su Sistema de Gestión de Calidad, como CMP-M1-183, CMP-M1-184, CMP-M1-185 y CMP-M1-186. Cada conjunto cuenta con cinco pesas de 1 kg, de clase de exactitud E_2 según la Recomendación Internacional OIML R 111-1 (Organización Internacional de Metrología Legal (OIML), 2004b); estas pesas se utilizaron como patrón. Los equipos identificados como CMP-M1-115, CMP-M1-116 y CMP-M1-117, con valores nominales de 5 kg, 10 kg y 20 kg respectivamente, con una clase de exactitud F_1 según la OIML R 111-1 se utilizaron como incógnitas, tal como se presenta en las Figuras 1 y 2.



FIGURA 1. Pesas utilizadas como patrón con identificación CMP-M1-183/184/185/186.



FIGURA 2. Pesas utilizadas como incógnitas con identificación CMP-M1-115/116/117.

Los cinco metrólogos directamente involucrados realizaron el estudio con tres valores nominales: 5 kg, 10 kg y 20 kg. A diferencia de los tres arreglos considerados para 10 kg y 20 kg, solo se consideraron dos arreglos de pesas para el valor nominal de 5 kg, ya que los metrólogos de mayor experiencia determinaron que no comprometían la estabilidad

de los arreglos de pesas de 1 kg. En la Figura 3 se presentan los diferentes arreglos utilizados para cada uno de los valores nominales.

Valor nominal	Arreglo 1	Arreglo 2	Arreglo 3
5 kg			N/A
10 kg			
20 kg			

FIGURA 3. Arreglos empleados con los respectivos patrones para las calibraciones de pesas de 5 kg, 10 kg y 20 kg. El color negro corresponde al grupo de pesas de 1 kg, que se ubicaron en la base; el azul al grupo intermedio; y el rojo a la(s) pesa(s) superior(es).

Se utilizaron dos comparadores para la calibración de los diferentes arreglos de pesas. En este sentido, el comparador de masa Mettler Toledo XPE10003SC, con un alcance máximo de hasta 10.1 kg, se utilizó para calibrar los diferentes arreglos de pesas de 5 kg y 10 kg, mientras que el comparador Mettler Toledo XPR26003LC, con un alcance máximo de hasta 26.1 kg, se utilizó para los tres arreglos de 20 kg. Esta sección del procedimiento se muestra en la Figura 4.

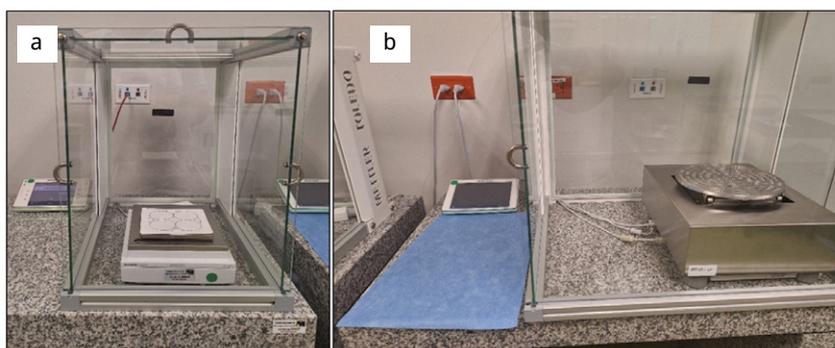


FIGURA 4. Comparadores utilizados para la calibración de pesas en el rango de 5 kg a 20 kg: a) Mettler Toledo XPE10003SC y b) Mettler Toledo XPR26003LC.

Durante las calibraciones, debido a que cada pesa de 1 kg cuenta con errores de masa convencional distintos, se acordó entre los metrólogos colocarlas en las mismas posiciones para evitar la contribución de variabilidad en la incertidumbre de medida debido a la excentricidad. Además, en el CENAMEP AIP se realizaron mediciones de sensibilidad de los comparadores durante sus verificaciones, con el fin de confirmar que los equipos cumplieran con las especificaciones establecidas por el fabricante.

La toma de datos se registró en la hoja de cálculo identificada como CL-M1-009. Este documento en Excel permite calcular el valor de masa convencional con el error y la incertidumbre, utilizando el método ABBA a lo largo de tres ciclos. Este método sigue una secuencia que alterna entre una pesa de referencia (A) y una incógnita (B), manteniendo el siguiente orden: A – B – B – A.

Con los datos del error y la incertidumbre de la masa convencional obtenidos de la hoja de cálculo, se elaboraron las distintas matrices del índice de compatibilidad o grado de equivalencia. Se utilizó la Ecuación 4, que trata del error normalizado, para realizar una comparación entre los metrólogos involucrados para cada uno de los arreglos realizados.

Finalmente, se realizó una comparación de los diferentes arreglos para cada valor nominal, calculando la desviación típica de los errores de masa convencional para identificar el arreglo con menor desviación típica. De esta manera, se pudo determinar el arreglo más reproducible.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de las comparaciones

A continuación, se muestran los resultados obtenidos tras la toma de datos. En las Tablas 1, 2 y 3 se muestran los errores de masa convencional EMC_i y su incertidumbre U de cada metrólogo, para cada uno de los valores nominales y sus respectivos arreglos. Además, se incluye la desviación estándar s de los errores obtenidos.

Las desviaciones estándar obtenidas en cada una de las tres tablas para el error de masa convencional permiten comparar y evaluar la consistencia de los diferentes arreglos para cada valor nominal. Este análisis es fundamental para identificar el arreglo más adecuado, ya que una menor desviación estándar indica mayor precisión y menor variabilidad en las mediciones del error de masa convencional, asegurando que los resultados se alinean con los estándares de calidad requeridos.

TABLA 1. Error de masa convencional obtenido durante la calibración de la pesa de 5 kg.

Error de masa convencional						
Participantes	Arreglo 1			Arreglo 2		
	EMC_i (mg)	$U (k = 2)$ (mg)	s (mg)	EMC_i (mg)	$U (k = 2)$ (mg)	s (mg)
Metrólogo I	1.0	2.9	1.1	2.0	3.2	2.8
Metrólogo II	0.0	3.2		1.0	2.7	
Metrólogo III	-1.0	2.7		-5.0	3.4	
Metrólogo IV	1.0	2.7		0.0	2.7	
Metrólogo V	2.0	2.9		1.0	2.8	

TABLA 2. Error de masa convencional obtenido durante la calibración de la pesa de 10 kg.

Error de masa convencional									
Participantes	Arreglo 1			Arreglo 2			Arreglo 3		
	EMC _i (mg)	U (k = 2) (mg)	s (mg)	EMC _i (mg)	U (k = 2) (mg)	s (mg)	EMC _i (mg)	U (k = 2) (mg)	s (mg)
Metrólogo I	1.0	5.2	3.2	3.0	5.5	2.4	-1.0	5.3	2.3
Metrólogo II	1.0	5.3		1.0	5.5		0.0	5.3	
Metrólogo III	-6.0	5.7		1.0	5.3		-2.0	5.3	
Metrólogo IV	0.0	5.5		0.0	5.5		1.0	5.6	
Metrólogo V	2.0	5.2		6.0	5.4		4.0	5.5	

TABLA 3. Error de masa convencional obtenido durante la calibración de la pesa de 20 kg.

Error de masa convencional									
Participantes	Arreglo 1			Arreglo 2			Arreglo 3		
	EMC _i (mg)	U (k = 2) (mg)	s (mg)	EMC _i (mg)	U (k = 2) (mg)	s (mg)	EMC _i (mg)	U (k = 2) (mg)	s (mg)
Metrólogo I	-13.0	10.4	6.7	-11.0	10.5	3.8	-11.0	10.4	5.4
Metrólogo II	-13.0	10.3		-11.0	10.5		-11.0	10.3	
Metrólogo III	-13.0	10.4		-13.0	10.3		-10.0	10.3	
Metrólogo IV	-20.0	10.3		-16.0	10.4		-14.0	10.3	
Metrólogo V	-28.0	10.5		-20.0	10.4		-23.0	10.4	

Por otra parte, las Figuras 5, 6 y 7 muestran la representación de los datos presentados en las Tablas 1, 2 y 3, respectivamente. En estas gráficas se puede observar la tendencia de los resultados obtenidos por cada metrólogo. Las líneas horizontales rojas indican los límites establecidos en cada punto, calculados a partir de la incertidumbre asociada al error de masa convencional.

En la Figura 5 se observa que los errores obtenidos se encuentran dentro de los límites definidos por cada operador, lo que subraya la consistencia en las mediciones realizadas en los arreglos de 5 kg. De igual forma, en la Figura 6, los errores también se mantienen dentro de los límites permitidos, indicando un control adecuado de la incertidumbre en las calibraciones de 10 kg.

En la Figura 7 los tres arreglos muestran una tendencia similar, lo que indica una buena reproducibilidad entre los metrólogos para cada uno de los diferentes arreglos utilizados en las calibraciones de 20 kg. Aunque los tres arreglos presentan una dispersión considerable, el arreglo 2 se destacó al mostrar la menor desviación estándar, tal como se muestra en la Tabla 3.

La concordancia de los errores dentro de los límites y la consistencia observada en todos los arreglos refuerzan la fiabilidad del método de calibración empleado. Esto tiene implicaciones prácticas importantes, ya que garantiza que los resultados de las calibraciones realizadas en el centro cumplen con los estándares de exactitud requeridos para la industria panameña, especialmente en procesos que demanden alta exactitud.

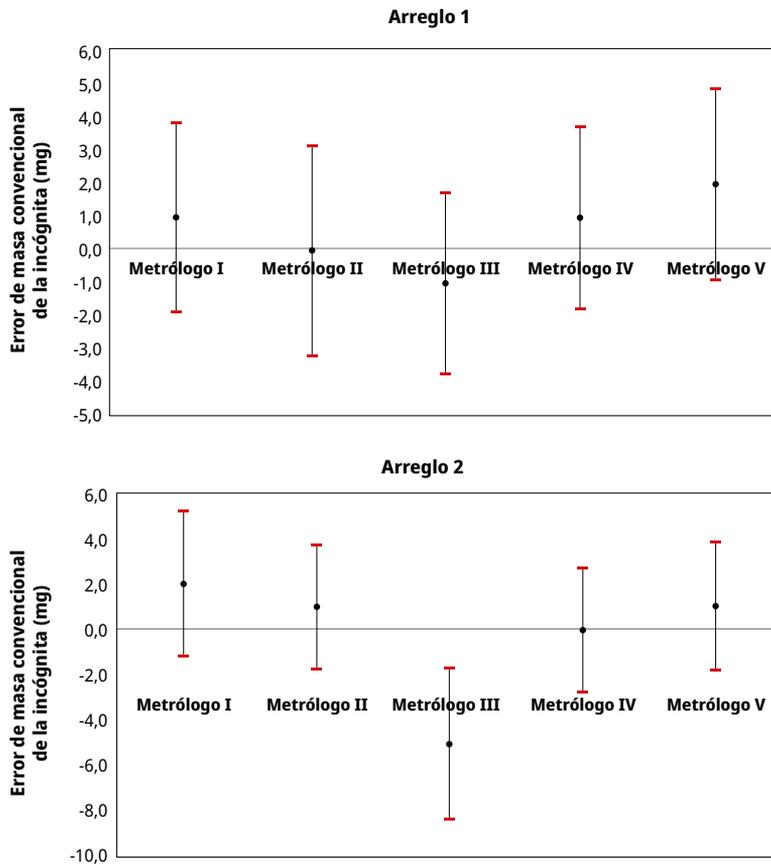


FIGURA 5. Comparación de los errores de masa convencional entre los metrologos obtenidos durante la calibración de la pesa de 5 kg.

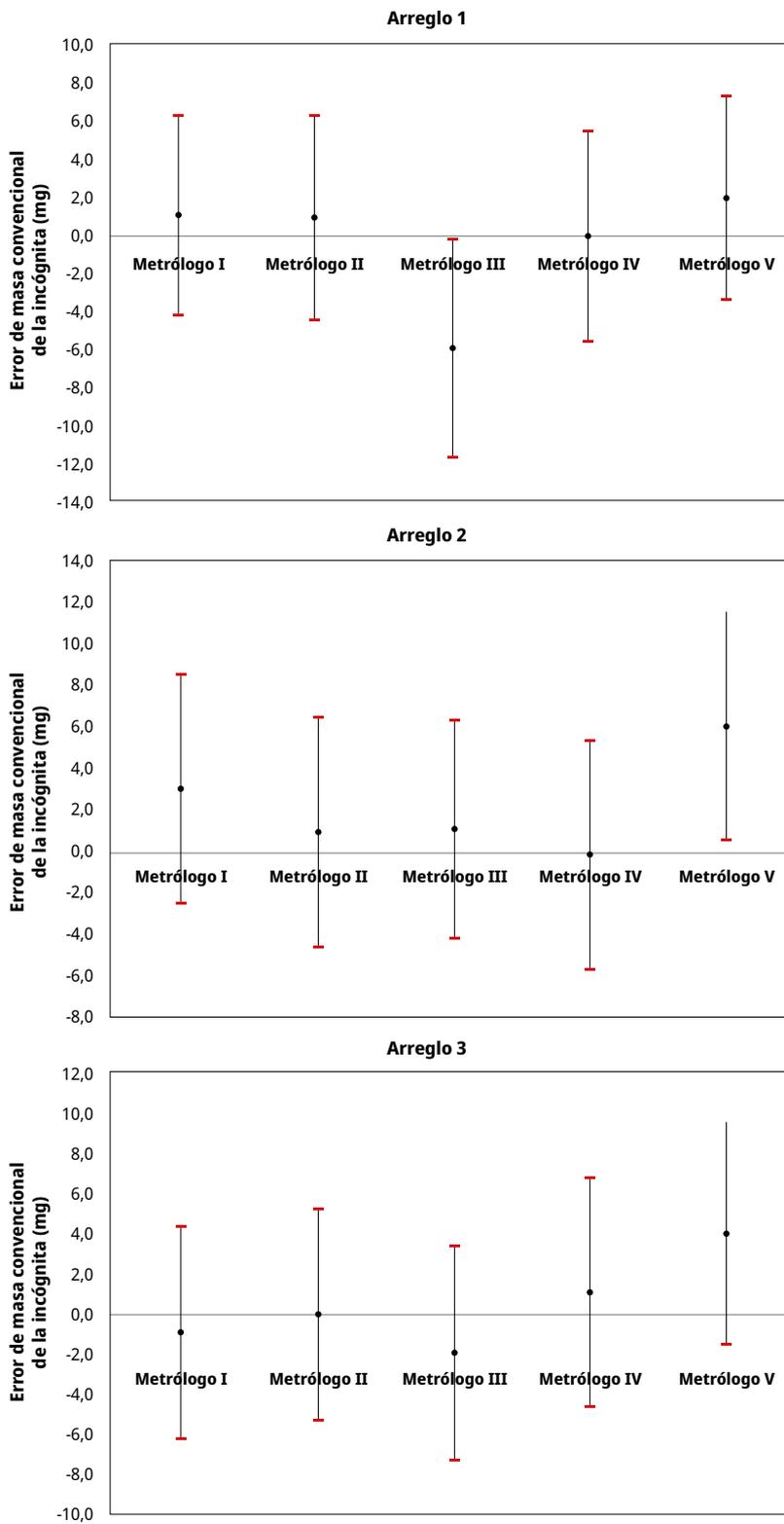


FIGURA 6. Comparación de los errores de masa convencional entre los metrologos obtenidos durante la calibración de la pesa de 10 kg.

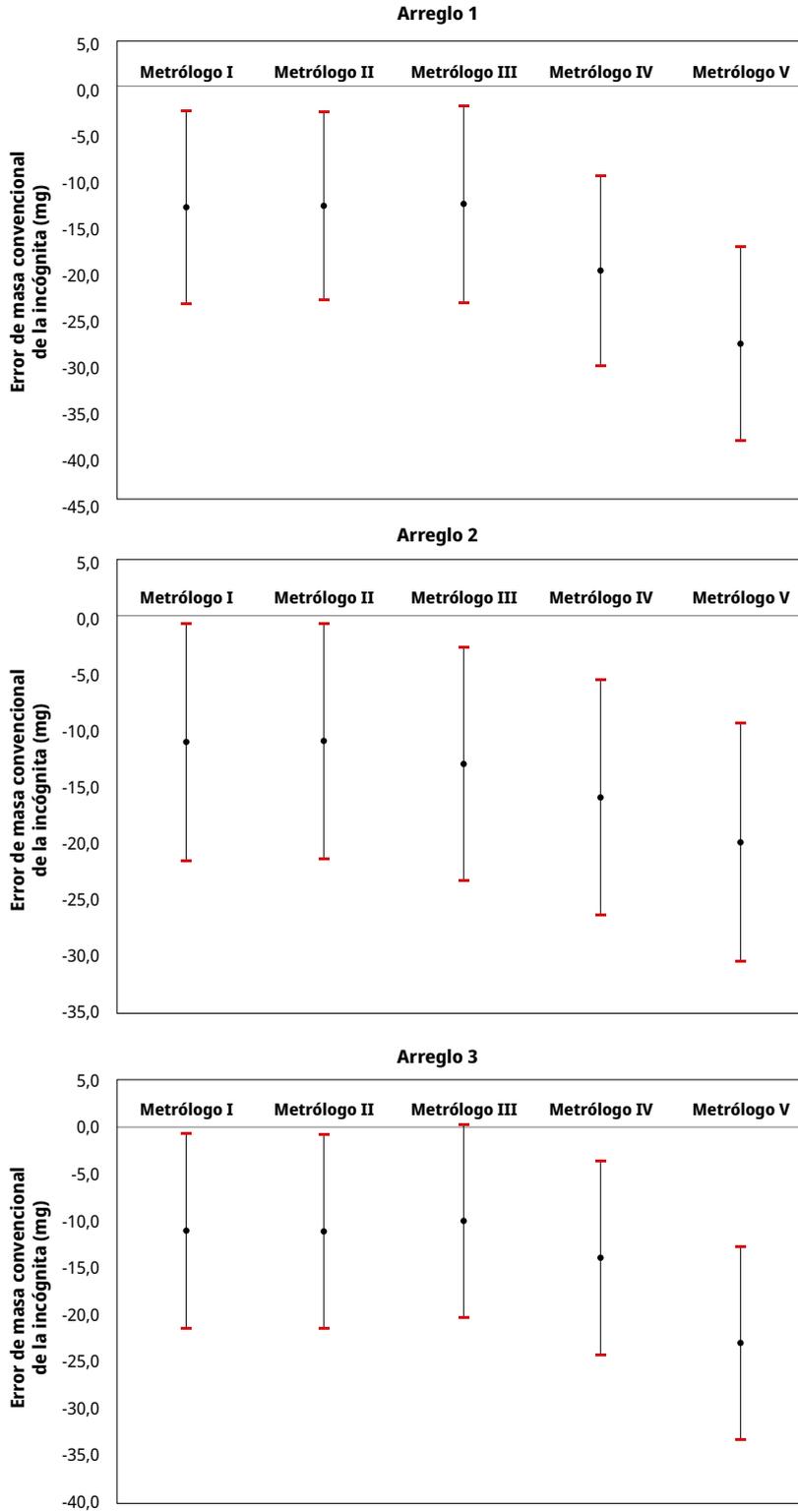


FIGURA 7. Comparación de los errores de masa convencional entre los metrologos obtenidos durante la calibración de la pesa de 20 kg.

Por otra parte, en las Tablas 4, 5 y 6 se presentan las matrices de los índices de compatibilidad para los distintos valores nominales y sus respectivos arreglos.

TABLA 4. Matriz de índices de compatibilidad para el valor nominal de 5 kg.

Matriz de índices de compatibilidad					
Arreglo 1					
Participantes	Metrólogo I	Metrólogo II	Metrólogo III	Metrólogo IV	Metrólogo V
Metrólogo I	0.0	0.2	0.5	0.0	0.2
Metrólogo II	0.2	0.0	0.2	0.2	0.5
Metrólogo III	0.5	0.2	0.0	0.5	0.8
Metrólogo IV	0.0	0.2	0.5	0.0	0.2
Metrólogo V	0.2	0.5	0.8	0.2	0.0
Arreglo 2					
Metrólogo I	0.0	0.2	1.5	0.5	0.2
Metrólogo II	0.2	0.0	1.4	0.3	0.0
Metrólogo III	1.5	1.4	0.0	1.2	1.4
Metrólogo IV	0.5	0.3	1.2	0.0	0.2
Metrólogo V	0.2	0.0	1.4	0.2	0.0

TABLA 5. Matriz de índices de compatibilidad para el valor nominal de 10 kg.

Matriz de índices de compatibilidad					
Arreglo 1					
Participantes	Metrólogo I	Metrólogo II	Metrólogo III	Metrólogo IV	Metrólogo V
Metrólogo I	0.0	0.0	0.9	0.1	0.1
Metrólogo II	0.0	0.0	0.9	0.1	0.1
Metrólogo III	0.9	0.9	0.0	0.8	1.0
Metrólogo IV	0.1	0.1	0.8	0.0	0.3
Metrólogo V	0.1	0.1	1.0	0.3	0.0
Arreglo 2					
Metrólogo I	0.0	0.3	0.3	0.4	0.4
Metrólogo II	0.3	0.0	0.0	0.1	0.6
Metrólogo III	0.3	0.0	0.0	0.1	0.7

Matriz de índices de compatibilidad					
Metrólogo IV	0.4	0.1	0.1	0.0	0.8
Metrólogo V	0.4	0.6	0.7	0.8	0.0
Arreglo 3					
Metrólogo I	0.0	0.1	0.1	0.3	0.7
Metrólogo II	0.1	0.0	0.3	0.1	0.5
Metrólogo III	0.1	0.3	0.0	0.4	0.8
Metrólogo IV	0.3	0.1	0.4	0.0	0.4
Metrólogo V	0.7	0.5	0.8	0.4	0.0

TABLA 6. Matriz de índices de compatibilidad para el valor nominal de 20 kg.

Matriz de índices de compatibilidad					
Arreglo 1					
Participantes	Metrólogo I	Metrólogo II	Metrólogo III	Metrólogo IV	Metrólogo V
Metrólogo I	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0
Metrólogo II	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0
Metrólogo III	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0
Metrólogo IV	0.5	0.5	0.5	0.0	0.5
Metrólogo V	1.0	1.0	1.0	0.5	0.0
Arreglo 2					
Metrólogo I	0.0	0.0	0.1	0.3	0.6
Metrólogo II	0.0	0.0	0.1	0.3	0.6
Metrólogo III	0.1	0.1	0.0	0.2	0.5
Metrólogo IV	0.3	0.3	0.2	0.0	0.3
Metrólogo V	0.6	0.6	0.5	0.3	0.0
Arreglo 3					
Metrólogo I	0.0	0.0	0.1	0.2	0.8
Metrólogo II	0.0	0.0	0.1	0.2	0.8
Metrólogo III	0.1	0.1	0.0	0.3	0.9
Metrólogo IV	0.2	0.2	0.3	0.0	0.6
Metrólogo V	0.8	0.8	0.9	0.6	0.0

Discusión sobre los arreglos realizados

En las Tablas 1, 2 y 3 se presentan las desviaciones típicas obtenidas a partir de los datos registrados por cada metrólogo para los diferentes arreglos empleados en los distintos valores nominales. La Tabla 1 muestra que la desviación típica del arreglo 1 es más baja que la del arreglo 2, lo que indica que el arreglo 1 es el más adecuado, ya que presenta menos variabilidad entre los participantes para la calibración la pesa de 5 kg.

Por otro lado, en la Tabla 2 se observa que la desviación típica del arreglo 3 es la más baja, lo que sugiere que este arreglo es la mejor opción para los metrólogos al realizar una calibración con la pesa de 10 kg. Asimismo, la Tabla 3 muestra que el arreglo 2 es el recomendado para calibraciones de pesas de 20 kg, ya que presenta menos desviaciones en comparación con los arreglos 1 y 3.

Por otra parte, las Figuras 5, 6 y 7 presentan los resultados de las mediciones realizadas por los distintos metrólogos. Estos datos fueron obtenidos a partir de las matrices de los índices de compatibilidad, lo que permitió observar y relacionar a cada metrólogo involucrado para realizar un estudio de reproducibilidad para los distintos arreglos con los respectivos valores nominales.

En la Figura 5 se presentan los resultados para los arreglos 1 y 2 con un valor nominal de 5 kg. En este caso, se observa que el metrólogo III se desvía notablemente de los demás en el arreglo 2, lo cual está posiblemente asociado al sistema utilizado durante esta calibración, que pudo haber afectado la comodidad de operación del metrólogo. Por su parte, la Figura 6 muestra una tendencia similar al mencionado anteriormente en el arreglo 1 de 10 kg. Por otro lado, los dos arreglos restantes muestran una tendencia similar entre sí. Finalmente, en la Figura 7 se muestra una tendencia muy similar entre los distintos arreglos. En la calibración de la pesa de 20 kg, al variar los arreglos, se mantiene una reproducibilidad para cada metrólogo.

Las Tablas 4, 5 y 6 representan las matrices de índices de compatibilidad basadas en el error normalizado de los resultados obtenidos para el error de masa convencional. En la Tabla 4, el arreglo 1 muestra que $|E_n| \leq 1$, lo que indica que los resultados entre los metrólogos son consistentes y aceptables. Sin embargo, en el arreglo 2 se observa que $|E_n| > 1$ con relación al metrólogo III, lo que señala que sus resultados se desvían significativamente de los obtenidos por los demás involucrados. En las Tablas 5 y 6, los tres arreglos presentan $|E_n| \leq 1$, lo que confirma que los resultados son aceptables entre todos los metrólogos.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio indican que la elección del arreglo de las pesas para una calibración influye significativamente en la exactitud y reproducibilidad de las mediciones realizadas por los metrólogos. Específicamente, el arreglo 1 se destaca como el más efectivo para calibraciones con un valor nominal de 5 kg, mientras que el arreglo 3 es preferible para 10 kg; por su parte, el arreglo 2 es el más adecuado para 20 kg. Además, se observó que las diferencias en la tendencia observada entre los metrólogos, como en el caso del metrólogo III para el arreglo 2 del valor nominal de 10 kg, pueden estar

influenciadas por factores asociados a la comodidad y facilidad al colocar las pesas en el comparador. Estos hallazgos subrayan la importancia de seleccionar el arreglo adecuado para mejorar la exactitud y consistencias en las calibraciones de pesas, optimizando así la eficiencia de los procesos metroológicos.

Los resultados obtenidos por el metrologo III han generado interrogantes sobre la razón exacta de su desviación. Por consiguiente, se plantea la hipótesis de que factores relacionados con la reproducibilidad y la excentricidad podrían estar influyendo. Para investigar esta posibilidad, se sugiere llevar a cabo estudios adicionales con los arreglos donde se han observado desviaciones significativas en comparación con los demás metrologos.

Con este estudio, el CENAMEP AIP busca mejorar el servicio de calibración de pesas de 5 kg, 10 kg y 20 kg de clase F_1 , con la meta de fortalecer su oferta para la industria panameña. Los resultados han sido utilizados para orientar a los integrantes del Laboratorio Secundario de Masas, contribuyendo a consolidar una línea de investigación y a identificar el arreglo más confiable para este tipo de calibraciones. Esta línea de investigación se enfocó en el estudio de procedimientos de calibración confiables, que le aseguren a la industria panameña que las mediciones realizadas consideran aspectos importantes como la reproducibilidad de los resultados entre diferentes metrologos. En este marco, el objetivo planteado en este estudio fue cumplido.

A futuro se planea realizar más estudios en torno a los resultados obtenidos. Para continuar con la línea de investigación en el CENAMEP AIP se proyecta realizar investigaciones relacionadas a la susceptibilidad magnética y su posible impacto en este tipo de calibraciones, utilizando pesas de 1 kg. Asimismo, se tiene previsto incluir nuevos arreglos con diferentes valores nominales, ampliando el alcance de los estudios realizados en esta fase.

También se prevé realizar una comparación externa con otro instituto nacional de metrología (INM) para evaluar la exactitud de los datos obtenidos. Estas iniciativas prometen abrir nuevas fronteras en el campo de la metrología, mejorando la fiabilidad de nuestros procesos y posicionando al CENAMEP AIP como un referente en el ámbito de la calibración de pesas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro Nacional de Metrología de Panamá, Asociación de Interés Público (CENAMEP AIP), por facilitar las instalaciones necesarias para la realización de este estudio, a través del Laboratorio Secundario de Masas (M1). También expresamos nuestro agradecimiento a la Coordinación de Magnitudes Mecánicas y a su respectivo Coordinador, el metrologo José Kuruc, por la orientación técnica para llevar a cabo este estudio que aporta a la infraestructura de la calidad en Panamá. Asimismo, extendemos nuestro sincero agradecimiento al Dr. Jaime Estrella, Coordinador de I+D+i del CENAMEP AIP, por su valiosa orientación durante la revisión final de este manuscrito.

REFERENCIAS

- Becerra, L., 2003. *Control estadístico de las mediciones (Aplicación a la calibración de pesas)* [En línea]. México: CENAM. [Consulta: 12 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://www.cenam.mx/myd/pages/publicaciones/articulos/doc/Control%20Estad.pdf>
- Bureau Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), (s.d.). *Base de Datos KCDB – CENAMEP AIP* [En línea]. [s.l.]: [s.n.]. [Consulta: 1 de julio de 2024]. Disponible en: <https://www.bipm.org/kcdb/cmc/quick-search?keywords=Panama>.
- Centro Español de Metrología, 2008. *Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida* [En línea]. Madrid: CEM. [Consulta: 6 de julio de 2024]. Disponible en: <https://www.cem.es/sites/default/files/gum20digital1202010.pdf>
- Centro Español de Metrología, 2012. *Vocabulario Internacional de Metrología conceptos fundamentales y generales, y términos asociados* [En línea]. 3ra ed. Madrid: CEM. [Consulta: 16 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://www.cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf>
- Centro Español de Metrología, 2020. *Procedimiento ME025 para la determinación del valor convencional de masa* [En línea]. Madrid: CEM. [Consulta: 6 de julio de 2024]. Disponible en: https://www.cem.es/sites/default/files/me025me007-me015__masa_convencional_digital_ed1_0.pdf
- Centro Nacional de Metrología de Panamá, s.d. *Servicios de calibración por coordinación* [En línea]. Panamá: CENAMEP AIP. [Consulta: 21 de julio de 2024]. Disponible en: <https://www.cenamep.org.pa/calibraciones/>
- Chinchilla, C.; Guevara, D. y Quan, F., 2001. *Diagnóstico de la metrología en el área de masas y balanzas de la industria alimenticia* [En línea]. El Salvador: Universidad Don Bosco. [Consulta: 21 de julio de 2024]. Disponible en: <https://rd.udb.edu.sv/server/api/core/bitstreams/580ebc3e-7b1e-4efa-9086-77a6e5a84e31/content>
- Díaz, J., 2018. *Estudio de repetibilidad y reproducibilidad* [En línea]. México: Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga. [Consulta: 24 de julio de 2024]. Disponible en: <https://pabellon.tecnm.mx/CENTRODEINFORMACION/app/files/081050145.pdf>
- Luján, A.; Pezet, F. y Becerra, L., 2006. *Capacidad de medición y calibración en el laboratorio de Patrones de referencia (división masa y densidad)* [En línea]. México: CENAM. [Consulta: 4 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://cenam.mx/memsimp06/Trabajos%20Aceptados%20para%20CD/Posters/P-18.pdf>
- Moroto, A.; Boque, R.; Riu, J. y Rius, X., s.d. *Cálculo de incertidumbre en medidas físicas: Medida de una masa*. Tarragona: Universitat Rovira i Virgili.
- Organización Internacional de Metrología Legal (OIML), 2004a. *Conventional value of the result of weighing in air* [En línea]. Paris: OIML. [Consulta: 21 de junio de 2024]. Disponible en: https://www.oiml.org/en/files/pdf_d/d028-e04.pdf
- Organización Internacional de Metrología Legal (OIML), 2004b. *International Recommendation OIML R 111-1 Weights of classes E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ and M₃. Part 1: Metrological and technical requirements* [En línea]. Paris: OIML. [Consulta: 26 de junio de 2024]. Disponible en: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r111-1-e04.pdf
- Rocío, M. y Pellecer, J., 2002. *Metrología para no metrólogos*. 2da. ed. Guatemala: SIM OEA. pp. 47-54.

Talavera, M. y Pezet, F., 2002. *Trazabilidad en las mediciones de masa* [En línea]. México: CENAM. [Consulta: 21 de julio de 2024]. Disponible en: <https://www.cenam.mx/memorias/descarga/simposio%202002/doctos/te077.pdf>