



EQUIPO EDITORIAL

Dirección

Dr. Jorge Silveira

Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), Uruguay

CONSEJO EDITORIAL

Dra. Sofía Barrios

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

MBA. Ing. Mariela De Giuda

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

Dr. Andrés Dieste

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

Dr. Gustavo Domínguez

Gerente de Latitud - Fundación LATU, Uruguay

Dra. Gabriela Eguren

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

PhD. Federico Harte

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

MSc. Rosa Márquez

Latitud - Fundación LATU, Uruguay

Dr. Eduardo Méndez

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

PhD. Laura Moya Silva

Universidad ORT Uruguay, Facultad de Arquitectura, Uruguay

Dr. Daniel Vázquez

INIA La Estanzuela, Plataforma de Agroalimentos, Uruguay

MSc. Daniel Volpe

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

EDICIÓN

Carla Rizzotto

Edición técnica revista 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, Bibliolatio

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.



Somos miembros de:

Asociación Uruguaya de Revistas Académicas AURA



La colección completa se puede consultar en línea en <http://ojs.latu.org.uy/index.php/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 24 Julio-diciembre de 2022

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

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

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

DISEÑO Y ARMADO

Manosanta desarrollo editorial

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

SUMARIO

Artículos

- e605 **Aplicación industrial de levaduras nativas para la producción de cervezas artesanales**
Industrial application of native yeasts for the production of craft beers
Nara Mannise, Cecilia Schinca, Eduardo Boido, Francisco Carrau Bonomi, Karina Medina Rolando
- e622 **Evaluar la efectividad de la levadura de cerveza subproducto de la industria cervecera como bioestimulante en hidroponía**
Evaluate the effectiveness of brewer's yeast by-product of the brewing industry as a biostimulant in hydroponics
María Magdalena Vazquez, Silvina Quintana, Sandra Medici, Liesel Brenda Gende
- e599 **Tecnofuncionalidad de harinas integrales de maíces andinos (*Zea Mays*) nativas y extrudidas**
Technofunctionality of native and extruded Andean maize (*Zea Mays*) whole-grain flours
Rita Marisol Miranda, Natalia Ester Domínguez, María Alejandra Giménez, Manuel Oscar Lobo, Norma Cristina Sammán
- e600 **Efecto de la extrusión alcalina en las propiedades fisicoquímicas y funcionales de la harina integral de maíz andino**
Effect of alkaline extrusion on the physicochemical and functional properties of the whole andean corn flour
Natalia Ester Domínguez, Rita Marisol Miranda, María Alejandra Giménez, Manuel Oscar Lobo, Norma Cristina Sammán
- e623 **Experiencia de aplicación de microorganismos efectivos nativos (MEN) para el tratamiento de aguas residuales**
Application of effective microorganisms from native origin (MEN) for wastewater treatment
Gimena Echeverriborda, Federico Mesa, Guillermo Chalar, Carla Kruk, Claudia Piccini
- e624 **Relación entre frentes de convergencia y localización de la flota pesquera durante la ocurrencia de surgencia costera en Uruguay**
Relationship between convergence fronts and location of the coastal fleet during the occurrence of coastal upwelling in Uruguay
Camila de Mello, Marcelo Barreiro, Yamandú Marín, Leonardo Ortega, Romina Trinchin, Gaston Manta
- e621 **Resistividad eléctrica de la madera de *Pinus pseudostrabus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla***
Electrical resistivity of the wood of *Pinus pseudostrabus*, *Tabebuia rosea* and *Quercus scytophylla*
Javier Ramón Sotomayor Castellanos, Israel Macedo Alquicira, Ernesto Mendoza González

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 (<http://ojs.latu.org.uy>) o a contactarse con el Centro de Información Técnica del LATU a través del correo electrónico innotec@latu.org.uy para recibir instrucciones para el envío de artículos a nuestro proyecto editorial.

CÓDIGO ÉTICO DE INNOTEC

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

Los autores se comprometen a:

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

Los revisores se comprometen a:

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

El equipo editorial se compromete a:

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

INSTRUCCIONES A LOS AUTORES PARA PUBLICAR EN 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 6 meses.

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

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

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

Los autores están autorizados a realizar una publicación simultánea en sistemas de autoarchivo o repositorios institucionales.

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

PROCESO DE REVISIÓN

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

El comité técnico de arbitraje de 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.

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).

Evite las notas al pie en el desarrollo del artículo.
Denominaciones en latín: deben ir en cursiva.

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., 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.bfafh.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.

Aplicación industrial de levaduras nativas para la producción de cervezas artesanales

Industrial application of native yeasts for the production of craft beers

Aplicação industrial de leveduras nativas para a produção de cervejas artesanais

 **NARA MANNISE** (1)

 **CECILIA SCHINCA** (1)

 **EDUARDO BOIDO** (1)

 **FRANCISCO CARRAU** (1)

 **KARINA MEDINA** (1)

(1) Área de Enología y Biotecnología de Fermentaciones, Departamento de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Facultad de Química, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

RECIBIDO: 12/11/2021 → APROBADO: 15/7/2022 ✉ kmedina@fq.edu.uy

RESUMEN

Se realizó la aplicación y la caracterización cervecera industrial de dos cepas nativas de origen enológico pertenecientes a la especie *Saccharomyces cerevisiae* (Sc 00/30 y Sc 00/35), previamente seleccionadas para cerveza a escala de laboratorio, por su capacidad fermentativa, su actividad β -glicosidasa, y sus buenas características sensoriales en mostos cerveceros. Se llevaron a cabo elaboraciones de cerveza del estilo Belgian Specialty Ale en las instalaciones de una cervecería artesanal. Las inoculaciones se realizaron en mostos de cebada malteada dispuestos en barricas de roble de 225 litros. Los datos fisicoquímicos y sensoriales obtenidos están dentro de los rangos esperados para las cervezas de este estilo, destacándose la cepa Sc 00/30 por su menor valor de acidez volátil y mayor complejidad sensorial, con una diversidad de notas frutales, fundamentalmente manzana y pera. Los descriptores sensoriales encontrados vuelven a estas cepas interesantes para la elaboración de cervezas de estilos belgas (Belgian Golden Strong Ale), de trigo (German Wheat Beer y Weissbier), ahumadas (Rachbier) y frutales. Las pruebas a escala piloto reprodujeron los resultados obtenidos previamente en el laboratorio, por lo que la utilización de estas cepas *Saccharomyces cerevisiae* nativas provenientes de la industria enológica constituyen una herramienta de diferenciación productiva que disminuye la uniformización de sabores y aromas producido por las levaduras comerciales, y que podría posibilitar a futuro la obtención de cervezas con identidad uruguaya.

Palabras clave: *Saccharomyces cerevisiae*, fermentación, aromas, caracterización sensorial, escalado industrial.

ABSTRACT

Two native wine *Saccharomyces cerevisiae* strains (Sc 00/30 and Sc 00/35), previously selected at brewing laboratory scale, for their fermentative capacity, β -glycosidase activity, and good sensory characteristics in brewing musts, were applied and characterized for industrial brewing. Belgian Specialty Ale style beers were brewed at a craft brewery. Inoculations were carried out on malted barley musts in 225-litre oak barrels. The physicochemical and sensory data obtained are within the expected ranges for beers of this style, with the Sc 00/30 strain standing out for its lower volatile acidity value and improved sensory complexity, with a greater diversity of fruity notes, mainly apple and pear. The sensory descriptors found make them interesting strains for the production of Belgian style beers (Belgian Golden Strong Ale), wheat beers (German Wheat Beer, Weissbier), smoked beers (Rachbier) and fruit beers. The pilot scale tests reproduced the results obtained in the laboratory, so that the use of wine native *Saccharomyces cerevisiae* strains provide a brewing differentiation factor which decreases the standardization of flavours and aromas produced by commercial yeasts, making possible the obtention of beers with a Uruguayan identity in the future.

Keywords: *Saccharomyces cerevisiae*, fermentation, aromas, sensory profile, industrial scale-up.

RESUMO

Duas estirpes nativas de *Saccharomyces cerevisiae* (Sc 00/30 e Sc 00/35) de origem enológica, previamente seleccionadas para cerveja à escala laboratorial, pela sua capacidade fermentativa, actividade β -glicosidase e boas características sensoriais nos mostos cervejeiros, foram aplicadas e caracterizadas para o fabrico de cerveja industrial. Cervejas belgas estilo Ale da especialidade foram fabricadas numa cervejaria artesanal. Inoculações foram realizadas em mostos de cevada maltada em barris de carvalho de 225 litros. Os dados físico-químicos e sensoriais obtidos estão dentro das gamas esperadas para cervejas deste estilo, destacando-se a estirpe Sc 00/30 pelo seu menor valor de acidez volátil e maior complexidade sensorial, com uma maior diversidade de notas frutadas, principalmente de maçã e pêra. Os descritores sensoriais encontrados tornam-nos cepas interessantes para a produção de cervejas estilo belga (Golden Strong Ale belga), cervejas de trigo (cerveja de trigo alemã, Weissbier), cervejas fumadas (Rachbier) e cervejas de fruta. Os testes à escala piloto reproduziram os resultados obtidos no laboratório, de modo que a utilização destas estirpes nativas de *Saccharomyces cerevisiae* da industria enológica constitui um instrumento de diferenciação produtiva que diminui a uniformidade dos sabores e aromas produzidos pelas leveduras comerciais, e que permitirá obter no futuro cervejas com uma identidade uruguaia.

Palavras-chave: *Saccharomyces cerevisiae*, fermentação, aromas, caracterização sensorial, escalada industrial.

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, *Saccharomyces pastorianus* o *Saccharomyces carlsbergensis*, un híbrido entre *Saccharomyces cerevisiae* y *Saccharomyces eubayanus* (Martini y Martini, 1987), ha sido la levadura utilizada para fermentaciones de cervezas tipo Lager, las cuales representan casi el 90% de las cervezas disponibles en el mercado internacional (Varela, 2016). Por su parte, *Saccharomyces cerevisiae* es la levadura más comúnmente utilizada para la elaboración de cervezas tipo Ale, las que representan el 5% de la oferta mundial (Varela, 2016). El porcentaje restante abarca a las cervezas obtenidas por fermentaciones espontáneas y cultivos mixtos entre levaduras nativas y bacterias (Petruzzi, et al., 2016). Tanto para cervezas Lager como Ale, *Saccharomyces* es el género tradicional de la industria cervecera fundamentalmente por su eficiente capacidad fermentativa, y su alta tolerancia al etanol y a factores medioambientales adversos (Aslankoohi, et al., 2016).

En este sentido, durante la fermentación alcohólica las levaduras transforman los azúcares del mosto en etanol y anhídrido carbónico, produciendo y/o modificando una gran diversidad de compuestos aromáticos presentes en la malta y el lúpulo. Estos compuestos determinan en gran medida la calidad cervecera final, contribuyendo al perfil del aroma y el sabor. Los grupos de compuestos volátiles predominantes en las cervezas son los alcoholes superiores (Pires, et al., 2014), ésteres (Verstrepen, et al., 2003), aldehídos (Vanderhaegen, et al., 2003) y ácidos orgánicos (Ravasio, et al., 2018). La producción de la mayoría de ellos, por parte de las levaduras autóctonas, constituye gran parte del potencial microbiológico cervecero a desarrollar para enriquecer los productos finales de la fermentación (Pires, et al., 2014; Pretorius y Lambrechts, 2000).

Las fermentaciones que ocurren sin inocular ningún microorganismo son conocidas como fermentaciones naturales o espontáneas. Este proceso involucra la participación de diferentes levaduras *Saccharomyces* y no-*Saccharomyces* nativas. Este tipo de levaduras son mencionadas como nativas, indígenas o salvajes principalmente en procesos que no son estériles, como ocurre en la producción de cerveza, vino o sidra (Varela, 2016; Varela, et al., 2009).

Las levaduras nativas, tanto de *Saccharomyces* como de otras especies, se han ido retirando de diferentes entornos alrededor del mundo (Cubillos, et al., 2019). Antiguamente eran consideradas por los cerveceros como levaduras “no deseadas” (Hough, 1990; Kunze, 2006), pero este concepto ha ido cambiando con el tiempo, fundamentalmente en los últimos 5 años. Existe abundante literatura respecto a los cambios positivos o ventajas que se han obtenido por el uso de levaduras nativas en la elaboración de vinos, y en el último tiempo han aumentado las investigaciones relacionadas a la utilización de levaduras nativas en cervezas (Pires, et al., 2014; Michel, et al., 2016; Basso, et al., 2016; Varela, 2016; Burini, et al., 2021).

Por otro lado, las fermentaciones con levaduras comerciales son cada vez menos buscadas por las cerveceras artesanales debido a que generan productos uniformes carentes de innovación, produciendo una simplificación de los procesos y estandarización sensorial de las cervezas obtenidas (Molinet y Cubillos, 2020). Esto último es justamente lo que los consumidores actuales tienden a rechazar ya que buscan la aparición de nuevos aromas y sabores que complejicen las bebidas fermentadas y generen nuevas experiencias sensoriales (Gibson, et al., 2020; Burini, et al., 2021).

Vale destacar que tanto *Saccharomyces* como no-*Saccharomyces* excretan enzimas extracelulares (Ganga y Martínez, 2003; Jolly, et al., 2014), las cuales pueden llegar a generar un impacto sensorial sobre el aroma y el sabor. Por ejemplo, para vinos se han reportado varias especies de levaduras con una importante contribución en la composición aromática del producto final debido a la liberación de compuestos aromáticos glicosidados al medio (Pérez, et al., 2011; Swangkeaw, et al., 2009). Estas enzimas interactúan con los precursores aromáticos del mosto, volviéndolos activos aromáticamente e impactando en el aroma y sabor de las bebidas fermentadas. Por esta razón, entre otras, las levaduras pueden generar impacto en el llamado fenotipo del aroma y sabor, lo que constituye un factor importante y diferencial a la hora de seleccionar levaduras (Medina, et al. 2013; Carrau, et al., 2015).

En este contexto, el aislamiento, la selección y la caracterización aromática de cepas nativas de levaduras resulta una herramienta clave para el desarrollo de cervezas innovadoras que escapen al portafolio tradicional.

Basados en la biodiversidad de levaduras nativas y en lo expuesto anteriormente, se realizó la aplicación y caracterización industrial a escala piloto de dos cepas nativas *Saccharomyces cerevisiae* (Sc 00/30 y Sc 00/35), previamente seleccionadas a escala de laboratorio, por su capacidad fermentativa, elevada actividad β -glicosidasa y buenas características sensoriales (Pérez, et al., 2011; Larroque, 2020).

MATERIALES Y MÉTODOS

Cepas de levaduras

Se realizaron elaboraciones por duplicado en las instalaciones de una cervecería artesanal nacional, inoculándose las cepas *Saccharomyces cerevisiae* Sc 00/30 y Sc 00/35, ambas aisladas de uvas previamente seleccionadas para vinos (Pérez, et al., 2011) y posteriormente caracterizadas a escala de laboratorio para cervezas (Larroque, 2020). Fueron mantenidas en medio de cultivo YEPM (10 g/L de extracto de levadura, 10 g/L de peptona, 20 g/L de maltosa y 20 g/L de agar) y conservadas en un freezer a -75 °C, con solución de glicerol al 20%.

Elaboración a escala piloto

Las elaboraciones se llevaron adelante en una cervecería artesanal de reconocida trayectoria en Uruguay. Se realizaron por duplicado en mostos de cebada malteada dispuestos en barricas de roble americano, con un volumen de producción de 225 litros. Se utilizó un tamaño de inóculo de 1×10^7 cel/mL. El estilo de cerveza elaborado fue Belgian Specialty Ale por tratarse de un estilo que permite una mayor innovación, ya sea en el proceso productivo y/o en las materias primas, de acuerdo con la guía de estilos Beer Judge Certification Program (BJCP) (Beer Judge Certification Program, 2015).

Análisis fisicoquímico

Para cada una de las muestras se determinó el grado alcohólico, la acidez total, la acidez volátil y el pH, de acuerdo con las técnicas analíticas de la European Brewery Convention (European Brewery Convention, 2019a, 2019b, 2019c, 2019d).

Análisis sensorial

Una vez finalizado el proceso de fermentación y de maduración de las cervezas, se procedió a la realización del análisis sensorial. Se llevó a cabo con un panel de jueces nacionales certificados por BJCP, quienes realizaron el perfil sensorial descriptivo completo de las muestras de acuerdo con los procedimientos de Analytica EBC (European Brewery Convention, 2019e).

Análisis estadístico

Los datos fisicoquímicos obtenidos se procesaron por análisis de varianza. El análisis estadístico se realizó utilizando el software Statistica (StatSoft Inc., 2004).

RESULTADOS

Los resultados correspondientes al seguimiento y a la evolución de la fermentación alcohólica se muestran en la Figura 1, donde se observa la disminución de la densidad del mosto conforme avanza la fermentación alcohólica. En la cepa Sc 00/30 se registró una disminución de la densidad similar a lo largo de los siete días. Sin embargo, el comportamiento de la cepa Sc 00/35 fue diferente, presentando una caída abrupta entre los días 2 y 3, pasando de un valor de 1058 a otro de 1031. El valor luego se mantuvo relativamente estable con una pequeña disminución a 1025 en el día 4, cuando continuó con igual comportamiento que la cepa Sc 00/30. Ambas fermentaciones comenzaron con una densidad inicial de 1075 y alcanzaron una densidad final de $1014,5 \pm 0,5$ en Sc 00/30 y de $1015 \pm 1,0$ en Sc 00/35. Esto representó una atenuación del 66% y 67% respectivamente.

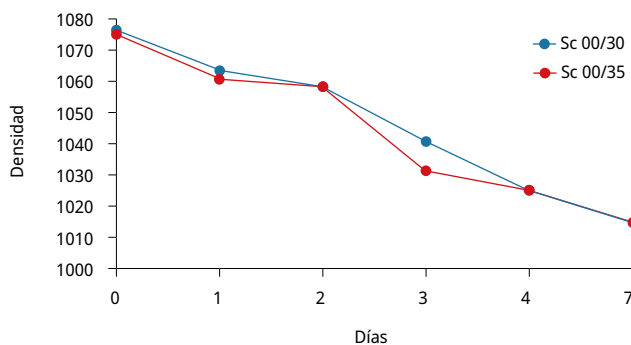


FIGURA 1. Seguimiento de la fermentación alcohólica.

En cuanto a los datos fisicoquímicos básicos de control (Tabla 1), no se observó una diferencia significativa entre las cepas para ninguno de los parámetros estudiados. No obstante, la cerveza elaborada con la cepa Sc 00/35 presentó valores mayores de acidez, fundamentalmente en el parámetro de acidez volátil, lo que también se vio reflejado en una disminución del pH comparativamente con la cepa Sc 00/30.

TABLA 1. Datos fisicoquímicos básicos de control para cada una de las cervezas obtenidas.

	Sc 00/30	Sc 00/35
Etanol (% v/v)	5,55 ± 0,05	5,60 ± 0,20
Acidez total (% m/m ácido acético)	0,13 ± 0,00	0,15 ± 0,01
Acidez volátil (% m/m ácido acético)	0,046 ± 0,001	0,064 ± 0,005
pH	4,36 ± 0,08	4,25 ± 0,03

En lo que respecta a la evaluación sensorial (Figura 2), en ambas cepas se encontraron aromas frutales, destacándose en la cepa Sc 00/30 notas descriptivas de manzana y pera, y en Sc 00/35 compota de manzana. En ambos casos, los evaluadores detectaron descriptores como madera, vainilla y caramelo, los cuales seguramente provienen de las barricas de roble.

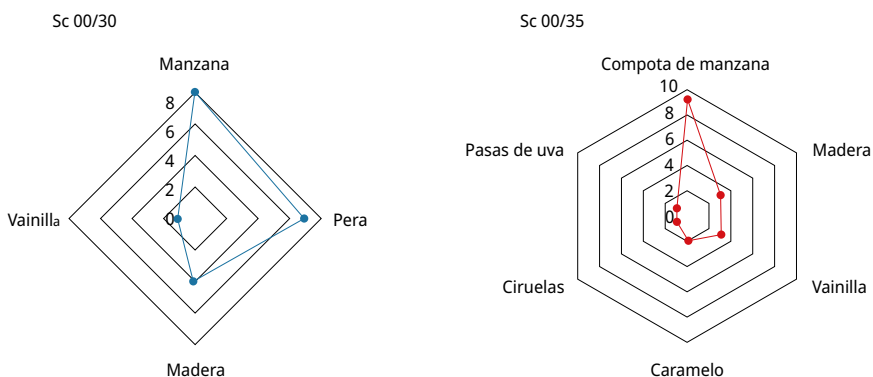


FIGURA 2. Evaluación sensorial de las cervezas obtenidas a escala industrial.

DISCUSIÓN

Los datos obtenidos están dentro de los rangos esperados para las cervezas del estilo Belgian Specialty Ale (Beer Judge Certification Program, 2015), destacándose la cepa Sc 00/30 por su menor valor de acidez volátil y mayor complejidad sensorial. Estos resultados confirmaron los reportes recientes de Postigo y otros (2021), demostrando la capacidad de las cepas *Saccharomyces cerevisiae* de origen enológico para su utilización con fines cerveceros.

Los descriptores frutales encontrados en este estudio confirmaron algunos de los resultados obtenidos por Larroque y otros (2021) a escala de laboratorio, donde se habían reportado descriptores frutales para la cepa Sc 00/30, y frutales y caramelo para la cepa Sc 00/35. En dicho trabajo previo de nuestro grupo también se habían reportado compuestos tales como acetato de isoamil, el cual se asocia a descriptores frutales (banana), y acetato-2-feniletilo, asociado con descriptores de manzana, rosa y miel. También se había reportado para ambas cepas la producción de octanoato de etilo con descriptores frutales y dulces y una concentración mayor a su umbral de percepción en cerveza (2 µg/L) (Meilgaard, 1975), encontrándose un valor de 95 UA (unidades de aroma) (Larroque, 2020).

Los compuestos mencionados vuelven a estas dos cepas interesantes para la elaboración de cervezas de estilos belgas (Belgian Golden Strong Ale), de trigo (German Wheat Beer y Weissbier), ahumadas (Rachbier) y frutales.

Las pruebas a escala piloto reprodujeron los resultados obtenidos en el laboratorio, por lo que es posible concluir que la utilización de las cepas *Saccharomyces cerevisiae* nativas constituye una herramienta de diferenciación productiva que según se estima permitirá una futura obtención de cervezas con identidad nacional. Será necesario continuar profundizando en el estudio de la dinámica poblacional a escala industrial de la cepa Sc 00/30, de manera de evaluar la prevalencia poblacional y su protagonismo fermentativo dado el ambiente de alta diversidad que existe a nivel de las cervecerías, producto de la microflora comercial a nivel de fábrica (Cocolin, et al., 2011; Canonico, et al., 2014). En línea con lo anterior, también será necesario un abordaje repetitivo de la cepa Sc 00/30 a escala productiva con miras a su posible domesticación industrial.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero del proyecto CSIC 1506 y PEDECIBA. Por otro lado, agradecen a la cervecería Malafama por ceder sus instalaciones para la realización del estudio.

REFERENCIAS

- Aslankoohi, E., Herrera-Malaver, B., Rezaei, M.N., Steensels, J., Courtin, C.M. y Verstrepen, K.J., 2016. Non-conventional yeast strains increase the aroma complexity of bread. En: *PLoS One*, 11, pp.1–18. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165126>
- Basso, R.F., Alcarde, A.R. y Portugal, C.B., 2016. Could non-*Saccharomyces* yeasts contribute on innovative brewing fermentations? En: *Food Res. Int.*, 86, pp.112–120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.06.002>
- Beer Judge Certification Program, 2015. *Guía de estilos de cerveza 2015* [En línea]. Minnesota: BJCP. [Consulta: 12 de marzo de 2021]. Disponible en: https://www.thebeertimes.com/wp-content/uploads/2017/08/2015_Guidelines_Beer_Espa%C3%B1ol-final.pdf

- Burini, J., Eizaguirre, J.I., Loviso, C. y Libkind, D., 2021. Non-conventional yeasts as tools for innovation and differentiation in brewing. En: *OSF Preprints*.
DOI: <https://doi.org/10.31219/osf.io/tn3c5>
- Canonico, L., Comitini, F. y Ciani, M., 2014. Dominance and influence of selected *Saccharomyces cerevisiae* strains on the analytical profile of craft beer refermentation. En: *J. Inst. Brew.*, 20(3), pp.262-267. DOI: <https://doi.org/10.1002/jib.133>
- Carrau, F., Gaggero, C. y Aguilar, P.S., 2015. Yeast diversity and native vigor for flavor phenotypes. En: *Trends Biotechnol.*, 33(3), pp.148-154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2014.12.009>
- Cocolin, L., Campolongo, S., Gorra, R., Rolle, L. y Rantsiou, K., 2011. *Saccharomyces cerevisiae* biodiversity during the brewing process of an artisanal beer: A preliminary study. En: *J. Inst. Brew.*, 117(3), pp.352-358. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2011.tb00479.x>
- Cubillos, F.A., Gibson, B., Grijalva-Vallejos, N., Krogerus, K. y Nikulin, J., 2019. Bioprospecting for brewers: Exploiting natural diversity for naturally diverse beers. En: *Yeast*, 36(6), pp.383-398. DOI: <https://doi.org/10.1002/yea.3380>
- European Brewery Convention, 2019a. *Analytica-EBC* [En línea]. Grundwerk: Hans Carl Getranke. Método 9.2.1 - Alcohol in Beer by Distillation. [Consulta: 12 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://brewup.eu/ebc-analytica/>
- European Brewery Convention, 2019b. *Analytica-EBC* [En línea]. Grundwerk: Hans Carl Getranke. Método 9.34 - Lactic Acid in Beer: Enzymatic Method. [Consulta: 12 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://brewup.eu/ebc-analytica/>
- European Brewery Convention, 2019c. *Analytica-EBC* [En línea]. Grundwerk: Hans Carl Getranke. Método 9.2.5 - Correction of Volatile Acidity. [Consulta: 12 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://brewup.eu/ebc-analytica/>
- European Brewery Convention, 2019d. *Analytica-EBC* [En línea]. Grundwerk: Hans Carl Getranke. Método 9.35 - pH of Beer. [Consulta: 12 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://brewup.eu/ebc-analytica/>
- European Brewery Convention, 2019e. *Analytica-EBC* [En línea]. Grundwerk: Hans Carl Getranke. Método 13.10 Sensory Analysis: Description Analysis. [Consulta: 12 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://brewup.eu/ebc-analytica/>
- Ganga, M.A. y Martínez, C., 2003. Effect of wine yeast monoculture practice on the biodiversity of non-*Saccharomyces* yeasts. En: *J. App. Microbiol.*, 96(1), pp.76-83. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2003.02080.x>
- Gibson, B., Dahabieh, M., Krogerus, K., Jouhten, P., Magalhães, F., Pereira, R. y Vidgren, V., 2020. Adaptive laboratory evolution of ale and lager yeasts for improved brewing efficiency and beer quality. En: *Annu. Rev. Food Sci. Technol.*, 11(1), pp.23-44. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-food-032519-051715>
- Hough, J.S., 1990. *Biología de la cerveza y de la malta*. Zaragoza: Editorial ACRIBIA, S.A
- Jolly, N.P., Varela, C. y Pretorius, I.S., 2014. Not your ordinary yeast: non-*Saccharomyces* yeasts in wine production uncovered. En: *FEMS Yeast Res.*, 14(2), pp. 215-237. DOI: <https://doi.org/10.1111/1567-1364.12111>
- Kunze, W., 2006. *Tecnología para cerveceros y malteros*. Berlin: VLB Berlin. ISBN: 978-3-921690-54-3

- Larroque, M.N., 2020. *Selección de levaduras nativas para la elaboración de cervezas artesanales*. Montevideo: Facultad de Química. (Tesis de Doctorado).
- Larroque, M., Carrau, F., Fariña, L., Boido, E., Dellacassa, E. y Medina, K., 2021. Effect of *Saccharomyces* and non-*Saccharomyces* native yeasts on beer aroma compounds. En: *International J. Food Microbiol.*, 337, 108953. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108953>
- Martini, A.V. y Martini, A., 1987. Three newly delimited species of *Saccharomyces sensu stricto*. A Van Leeuw. En: *J. Microb.*, 53, pp.77-84. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00419503>
- Medina, K., Boido, E., Fariña, L., Gioia, O., Gómez, M.E., Barquet, M., Gaggero, C., Dellacassa, E. y Carrau, F., 2013. Increased flavour diversity of Chardonnay wines by spontaneous fermentation and co-fermentation with *Hanseniaspora vineae*. En: *Food Chem.*, 141(3), pp.2513-2521. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.04.056>
- Meilgaard, 1975. Flavor chemistry of beer. Part II: flavour and threshold of 239 aroma volatiles. En: *MBAA TQ.*, 12(3), pp.151-168.
- Michel, M., Meier-Dörnberg, T., Jacob, F., Methner, F.J., Wagner, R.S. y Hutzler, M., 2016. Review: Pure non-*Saccharomyces* starter cultures for beer fermentation with a focus on secondary metabolites and practical applications. En: *J. Inst. Brew.*, 122(4), pp.569-587. DOI: <https://doi.org/10.1002/jib.381>
- Molinet, J. y Cubillos, F.A., 2020. Wild yeast for the future: exploring the use of wild strains for wine and beer fermentation. En: *Front. Genet.* DOI: <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.589350>
- Pérez, G., Fariña, L., Barquet, M., Boido, E., Gaggero, C., Dellacassa, E. y Carrau, F., 2011. A quick screening method to identify β -glucosidase activity in native wine yeast strains: application of Esculin Glycerol Agar (EGA) medium. En: *World J. Microbiol. Biotechnol.*, 27, pp.47-55. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-010-0425-4>
- Petruzzi, L., Rosaria Corbo, M., Sinigaglia, M. y Bevilacqua, A., 2016. Brewer's yeast in controlled and uncontrolled fermentations, with a focus on novel, nonconventional, and superior strains. En: *Food Rev. Int.*, 32, pp.341-363. DOI: <https://doi.org/10.1080/87559129.2015.1075211>
- Pires, E.J., Teixeira, J.A., Branyik, T. y Vicente, A.A., 2014. Yeast: the soul of beer's aroma - a review of flavour-active esters and higher alcohols produced by the brewing yeast. En: *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 98, pp.1937-1949. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5470-0>
- Postigo, V., García, M., Cabellos, J.M. y Arroyo, T., 2021. Wine *Saccharomyces* yeasts for beer fermentation. En: *Fermentation*, 7(4), pp.290. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation7040290>
- Pretorius, I.S. y Lambrechts, M.G., 2000. Yeast and its importance to wine aroma: a review. En: *S. Afr. J. Enol. Vitic.*, 21(1), pp.97-129. DOI: <https://doi.org/10.21548/21-1-3560>
- Ravasio, D., Carlin, S., Boekhout, T., Groenewald, M., Vrhovsek, U., Walther, A. y Wendland, J., 2018. Adding flavor to beverages with non-conventional yeasts. En: *Fermentation*, 4(1), pp.15. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation4010015>
- StatSoft Inc., 2004. *Electronic statistics textbook*. Vers.7. Tulsa: StatSoft Inc.

- Swangkeaw, J., Vichitphan, S., Butzke, C.E. y Vichitphan, K., 2009. The characterization of a novel *Pichia anomala* β -glucosidase with potentially aroma-enhancing capabilities in wine. En: *Ann. Microbiol.*, 59, pp.335. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03178336>
- Vanderhaegen, B., Neven, H., Coghe, S., Verstreppe, K., Derdelinckx, G. y Verachtert, H., 2003. Bioflavoring and beer refermentation. En: *App. Microbiol. Biotechnol.*, 62, pp.140-150. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1340-5>
- Varela, C., 2016. The impact of non-*Saccharomyces* yeasts in the production of alcoholic beverages. En: *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 100, pp.9861-9874. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7941-6>
- Varela, C., Siebert, T., Cozzolino, D., Rose, L., McLean, H. y Henschke, P.A., 2009. Discovering a chemical basis for differentiating wines made by fermentation with "wild" indigenous and inoculated yeasts: Role of yeast volatile compounds. En: *Aust. J. Grape Wine Res.*, 15, pp.238-248. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2009.00054.x>
- Verstreppe, K., Derdelinckx, G., Dufour, J., Winderickx, J., Thevelein, J., Pretorius, I. y Delvaux, F., 2003. Flavor-active esters: Adding fruitiness to beer. En: *J Biosci. Bioeng.*, 96(2), pp.110-118. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(03\)90112-5](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(03)90112-5)

Evaluar la efectividad de la levadura de cerveza subproducto de la industria cervecera como bioestimulante en hidroponía

Evaluate the effectiveness of brewer's yeast by-product of the brewing industry as a biostimulant in hydroponics

Avaliar a eficácia do subproduto de levedura de cerveja da indústria cervejeira como bioestimulante em hidroponia

 **MARÍA MAGDALENA VAZQUEZ** (1)

 **SILVINA QUINTANA** (1)

 **SANDRA MEDICI** (1)

 **LIESEL BRENDA GENDE** (1)

(1) Instituto de Investigaciones en Producción, Sanidad y Ambiente (IIPROSAM), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, Argentina.

RECIBIDO: 3/8/2022 → APROBADO: 17/11/2022 ✉ vazquezmague@gmail.com

RESUMEN

Es conocida la capacidad de algunos microorganismos de estimular el crecimiento y desarrollo de las plantas. Sin embargo, el uso de levaduras de la industria cervecera como agentes promotores del crecimiento de plantas (PGPM, por sus siglas en inglés) ha sido brevemente estudiado. El objetivo de este trabajo fue caracterizar y analizar el uso de la levadura residual de la fabricación de cerveza artesanal en cultivos hidropónicos. Se evaluó el efecto de la adición de dicha levadura en el crecimiento y desarrollo de *Arabidopsis thaliana*, *Eruca vesicaria* y *Lactuca sativa* en almácigos y en sistemas hidropónicos. Se observó un aumento significativo en el largo de la raíz principal luego del tratamiento con las suspensiones de levadura en *A. thaliana* y *E. vesicaria* crecidas en almácigos (SN 4.28 ± 0.15 , S05 7.30 ± 0.29 ; SN 39.68 ± 2.20 , S05 57.37 ± 2.80 , respectivamente). En sistemas hidropónicos de raíz flotante, la inoculación de levadura a la solución hidropónica incrementó un 30 % el área radicular de *L. sativa* en relación con el control. Se concluye que la inoculación de *S. cerevisiae* cepa J14 aislada del residuo de la elaboración de cerveza, sola o incorporada a la solución nutritiva de sistemas hidropónicos, podría ser una herramienta biotecnológica como bioestimulante y/o promotor del crecimiento vegetal.

Palabras clave: PGPM, sustentabilidad, *Arabidopsis thaliana*, *Eruca vesicaria*, *Lactuca sativa*.

ABSTRACT

The ability of some microorganisms to stimulate the growth and development of plants is known. However, the use of residual yeast from the artisanal brewing industry as plant growth promoting microorganisms (PGPM) has been briefly studied. The aim of this work was to characterize and analyze the use of residual yeast from the brewing industry in hydroponic vegetable crops. We evaluated the effects of yeast addition on plant growth of *Eruca vesicaria*, *Arabidopsis thaliana* y *Lactuca sativa* with this technique. A significant increase in the principal root length was observed after the treatment with the yeast suspensions in *A. thaliana* and *E. vesicaria* grown relative to the control (SN 4.28 ± 0.15 , S05 7.30 ± 0.29 ; SN 39.68 ± 2.20 , S05 57.37 ± 2.80 , respectively). In floating hydroponic systems, yeast inoculation to the hydroponic solution increased the root area of *L. sativa* by 30 % in relation to the control. Our results confirm that *Saccharomyces cerevisiae* strain J14 from the brewing industry may confer benefits in hydroponics crops with positive effects on root growth. These results validate the potential application of *S. cerevisiae* strain J14 in plant cultivation in hydroponic as a biotechnological tool.

Keywords: PGPM, sustainability, *Arabidopsis thaliana*, *Eruca vesicaria*, *Lactuca sativa*.

RESUMO

A capacidade de alguns microrganismos de estimular o crescimento e desenvolvimento de plantas é conhecida. No entanto, o uso de levedura residual da indústria cervejeira artesanal como agente promotor de crescimento vegetal (PGPM, por sua sigla em inglês) tem sido brevemente estudado. O objetivo deste trabalho foi caracterizar e analisar o uso de levedura residual da indústria cervejeira em hortaliças hidropônicas. Nós avaliamos os efeitos da adição de levedura no crescimento de plantas de *Eruca vesicaria*, *Arabidopsis thaliana* e *Lactuca sativa* com esta técnica. Um aumento significativo no comprimento da raiz principal e no número de raízes laterais foi observado após o tratamento com as suspensões de levedura em *A. thaliana* e *E. vesicaria* cultivadas em mudas (SN 4.28 ± 0.15 , S05 7.30 ± 0.29 ; SN 39.68 ± 2.20 , S05 57.37 ± 2.80 , respectivamente). Em sistemas hidropônicos de raízes flutuantes, a inoculação de leveduras à solução hidropônica aumentou a área radicular de *L. sativa* em 30 % em relação ao controle. Nossos resultados confirmam que a estirpe J14 de *Saccharomyces cerevisiae* da indústria cervejeira pode prover benefícios em cultivos hidropônicos com efeitos positivos no crescimento radicular. Esses resultados validam a potencial aplicação da cepa J14 de *S. cerevisiae* no cultivo de plantas em hidroponia como ferramenta biotecnológica.

Palavras-chave: PGPM, sustentabilidade, *Arabidopsis thaliana*, *Eruca vesicaria*, *Lactuca sativa*.

INTRODUCCIÓN

La hidroponía es un método de cultivo de plantas que utiliza nutrientes en su forma inorgánica disueltos en una solución líquida, con o sin la utilización de sustratos. En esta técnica las raíces se sumergen en la solución nutritiva, la cual presenta los

macronutrientes y micronutrientes necesarios para su crecimiento y desarrollo (Sambo, et al., 2019). Esta metodología se utiliza especialmente en áreas áridas, donde los requerimientos hídricos son limitantes (Martínez-Mate, et al., 2018). Actualmente la producción de alimentos es uno de los retos de sostenibilidad y sustentabilidad más importante del siglo XXI debido al rápido crecimiento de la población. Sin embargo, la tierra es un recurso limitado y más del 33 % de los suelos ya no son aptos para el cultivo debido a la contaminación, entre otras actividades antropogénicas (Abhilash, et al., 2016). En este escenario, el cultivo hidropónico podría significar una herramienta para abordar dicha problemática. Con esta técnica se pueden producir cultivos sin el uso de suelo, pesticidas o agroquímicos, promoviendo la generación de cultivos sustentables, la economía circular y las huertas urbanas (Baras, 2018; Bekuma, 2019). La hidroponía popular, por su parte, ha sido incentivada a través del Proyecto Regional para la Superación de la Pobreza en América Latina y el Caribe (RLA/86/004) y se trata de una técnica que continúa en auge (Marulanda e Izquierdo, 2003).

El componente microbiano del holobionte vegetal consiste en diferentes tipos de organismos, entre los que se incluyen hongos, arqueas y bacterias (Hardoim, et al., 2015). Se ha demostrado que el uso de rizobios, micorrizas y bacterias promotoras del crecimiento vegetal cumplen funciones importantes que respaldan el desarrollo y la salud de las plantas (Philippot, et al., 2013). Por tal motivo, se ha descrito a determinados microorganismos como promotores del crecimiento de las plantas (PGPM, por sus siglas en inglés). Las interacciones entre plantas y PGPM pueden ocurrir a través de una variedad de mecanismos biológicos, directos e indirectos, entre los que se destacan: fijación biológica de N₂ atmosférico por bacterias en las plantas de leguminosas, producción de quelantes capaces de convertir minerales insolubles en formas biodisponibles, producción de fitohormonas como el ácido indol-3-acético (IAA), las citoquininas, las giberelinas y otros mecanismos relacionados con el control biológico (Naamala y Smith, 2020; Glick, 2012).

En las últimas tres décadas, los PGPM han mostrado potencial para ser aplicados como biofertilizantes o bioplaguicidas (Compant, et al., 2019; Villanueva, 2021). De esta forma, los PGPM podrían tener un papel importante en la agricultura sostenible ya que su aplicación podría ayudar a aumentar la fertilidad de los suelos, la calidad alimentaria y nutricional, así como también mejorar la sustentabilidad de los agroecosistemas (Abhilash, et al., 2019).

La cerveza es la bebida resultante del proceso de fermentación del mosto procedente de la malta de cebada (sola o mezclada y aromatizada con lúpulo) mediante levadura, principalmente *Saccharomyces cerevisiae* (código alimentario argentino, CAA Art. 1080). Durante el proceso de elaboración, en la industria cervecera se generan dos subproductos de mayor importancia: el bagazo y la levadura (Ramayo Cruz, 2018). La cantidad de levadura residual obtenida depende de los parámetros de fermentación (aireación, temperatura y pH), el tipo de microorganismo, la concentración de inóculo y la viabilidad y vitalidad de las células, entre otros. La masa de levadura resultante durante el proceso de elaboración varía entre 1,5 y 3 kg por cada 100 L de cerveza producidos (Olajire, 2012). Ese barro obtenido es retirado de los fermentadores, en algún caso reutilizado, y luego desechado.

Se ha identificado una gran variedad de géneros de levadura pertenecientes a la microbiota de la superficie de las plantas. Varios de ellos han sido identificados como PGPM y/o agentes de biocontrol contra enfermedades en diferentes tejidos vegetales

(Mukherjee, et al., 2020). Se demostró en una variedad de géneros de levadura la producción de auxinas, solubilización de fosfatos, oxidación de nitrógeno, oxidación de azufre y producción de sideróforos (El-Tarabily y Sivasithamparam 2006; Nassar, et al., 2005, Falih, et al., 1995 y Cloete, et al., 2009). Particularmente, se evidenció que la adición de *Saccharomyces cerevisiae* como biofertilizante en el suelo induce cambios morfológicos, aumenta la biomasa de las raíces y el contenido de nitrógeno (N) y fósforo (P) en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*), y de caña de azúcar (*Saccharum officinarum x spontaneum*) (Lonhienne, et al., 2015). Sin embargo, la mayoría de los efectos mencionados anteriormente de *Saccharomyces cerevisiae* han sido estudiados en el sistema de suelo, mientras que su asociación en los cultivos hidropónicos ha sido brevemente analizado.

El objetivo general de este trabajo fue caracterizar y analizar el uso de la levadura residual de la fabricación de cerveza artesanal en cultivos hidropónicos. Para ello se evaluó el efecto de la inoculación de levadura en los procesos de germinación, crecimiento y desarrollo de plantas de *Eruca vesicaria* spp. (rúcula), *Arabidopsis thaliana*, ambas de la familia de las Brassicaceae, y de *Lactuca sativa* spp. (lechuga), de la familia de las Asteraceae, en el cultivo hidropónico. Se evaluaron parámetros de crecimiento y desarrollo en la fase de semilla-plántula y de plántula-planta.

MATERIALES Y MÉTODOS

Aislamiento y caracterización de la levadura

Aislamiento

El aislamiento de las levaduras se realizó en el medio Hongos y Levaduras (extracto de levadura 0.5 % p/v, glucosa 2 % p/v, cloranfenicol 0.01 % p/v y agar 1.5 % p/v, marca Britania, Argentina). Para ello, se utilizó el barro de levaduras desechadas luego de la etapa de fermentación del mosto en la fabricación de cerveza artesanal. Se realizó el conteo de células/ml con cámara de Neubauer (Smart, et al., 1999) y se calculó el porcentaje de viabilidad. Se corroboró el recuento mediante técnica espectrofotométrica a una DO (densidad óptica) a 620 nm de 0.1 en espectrofotómetro (BIOTRAZA® modelo 721). Posteriormente se realizaron las diluciones apropiadas a fin de obtener 1000 células/ml de levaduras para los ensayos.

Caracterización

Se caracterizaron las levaduras mediante la amplificación de la región D1-D2 del gen de la subunidad grande ribosomal (LSU) con los cebadores NL1 (5'-GCATATCAATAAGCGGAGGAAAAG-3') y NL4 (5'-GGTCCGTGTTCAAGACGG-3'), de acuerdo con Kurtzman y Robnett (1997). Las reacciones de PCR se realizaron en un termociclador Rotor Gene Q (Qiagen, Hilden, Alemania) con una mezcla preformada con el intercalante Evagreen (Kapa HRM Fast, Biosystems). Luego de la amplificación, los productos de PCR fueron analizados en gel de agarosa y purificados utilizando el kit Accuprep Gel

Purification Kit (Bioneer, South Korea). Los productos purificados se secuenciaron mediante el Kit BigDye Terminator v1.1 Cycle Sequencing Kit (Applied Biosystems), en el equipo ABI Prism 310 Genetic Analyzer (Applied Biosystems). Las secuencias generadas se analizaron mediante el software BLAST+2.12.0 (Boratyn, et al., 2013).

La determinación de proteínas totales se realizó en base a la metodología de Kjeldhal (AOAC International, 1984). El estudio del metabolismo nitrogenado de las levaduras se evaluó mediante la producción de aminoácidos durante el crecimiento de las cepas. La separación e identificación de los aminoácidos se realizó mediante la técnica de HPLC-MSMS, descrita por Gómez Alonso y otros (2007). Para la digestión de la muestra se utilizó un balón de 100 ml y se pesó cantidad suficiente de muestra con un contenido de aproximadamente 5 mg de proteína. Posteriormente se agregaron al balón 10 ml de solución HCl-Fenol, el cual se colocó en un manto calefactor (80 °C) y se conectó a un refrigerante. La muestra se procesó con reflujo durante 3-4 días. Luego se trasvasó a vial de autosampler 100 ul de muestra (filtrada) y se agregó 900 ul de ACN (acetónitrilo), conservándose refrigerada a -20 °C de temperatura hasta efectuar la corrida cromatográfica. Las muestras fueron inyectadas en cromatógrafo LC MSMS marca Waters Xevo Infinity®, acoplado a un detector MSMS TQS Micro. Se usó la columna BEH amido 150 x 2.1 mm – Tp: 7.1 um (Waters), y los estándares de los aminoácidos cuantificados fueron provistos por SIGMA-Aldrich®.

Para la determinación de aniones y cationes, las muestras de levaduras se llevaron a cenizas en una mufla a 600 °C (AOAC International, 1998), y luego se resuspendieron en agua. Las muestras fueron filtradas previamente con filtro de jeringa de 0.45 µm (micrómetro) y se colocaron en tubos de plástico limpios y secos. Posteriormente se analizaron mediante cromatografía iónica. Se utilizó un cromatógrafo iónico, modelo 940 Professional IC Vario, Metrohm®. Se utilizó la columna Metrosep Supp 5 – 150/4.0 para la corrida cromatográfica de aniones, y la columna Metrosep C4 150/4.0 para la corrida cromatográfica de cationes. Las columnas se encontraban termostatzadas a 30 °C. El flujo para aniones fue 0.7 ml/min y para cationes, 0.9 ml/min.

Materiales vegetales

Se utilizaron semillas de *A. thaliana* ecotipo Columbia (COL-0), obtenidas del Arabidopsis Biological Resource Center (ABRC, Columbus, OH), y semillas de *E. vesicaria*, obtenidas de un proveedor local para los ensayos de germinación. En los ensayos de crecimiento y desarrollo radicular se utilizaron plántulas de *L. sativa*, *A. thaliana* ecotipo Columbia (COL-0) y *E. vesicaria*, obtenidas de un proveedor local.

Soluciones nutritivas

Las soluciones nutritivas se basaron en la fórmula de Resh (Resh, 2015). En los ensayos de germinación y crecimiento en almárgos se utilizó una concentración de 3×10^{-3} % v/v SNCRC (solución nutritiva convencional de Resh concentrada) (SNCRC1), mientras que en los ensayos con la técnica de raíz flotante se usó una concentración de 5×10^{-3} % v/v de SNCRC (SNCRC2). La concentración de SNCRC fue para los macronutrientes nitrógeno: 140 ppm, fósforo: 50 ppm, potasio: 352 ppm, calcio: 180 ppm, magnesio: 50 ppm, azufre: 168 ppm,

hierro: 5 ppm y de micronutrientes manganeso: 0.8 ppm, cobre: 0.07 ppm, zinc: 0.2 ppm, boro: 0.3 ppm, molibdeno: 0.03 ppm.

Condiciones de crecimiento

Ensayos de germinación

Las semillas se esterilizaron superficialmente con etanol al 70 % v/v durante 10 min, con 35 % v/v de solución de hipoclorito de sodio comercial durante 1 min, y se enjuagaron cinco veces con agua estéril. Las semillas se estratificaron a $4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$ durante 3 días en la oscuridad. El ensayo de germinación se realizó en placas de Petri conteniendo papel de filtro embebido con 15 ml de la solución nutritiva de hidroponía SNCR1 (SN) o 15 ml de solución de levaduras 1000 células/ml (S05). Se dispusieron las placas en forma horizontal en una cámara a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 4$ a 16 h de luz y 8 h de oscuridad. La tasa de germinación se evaluó mediante la cuantificación del porcentaje de germinación luego de 48, 72 y 96 h. El evento de germinación se definió como la total emergencia de la radícula (Bewley y Black, 1978; Weigel y Glazebrook, 2002).

Ensayos de crecimiento en sustrato de cultivo hidropónico

El crecimiento de plántulas de *A. thaliana* y *E. vesicaria* en sustrato de cultivo hidropónico se realizó en bandejas conteniendo fibra de coco (constituido principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa) (Rincón Reyna, et al., 2016). Se sembraron las semillas esterilizadas y estratificadas sobre el sustrato y las bandejas se regaron una vez al día con agua destilada (control), con la solución nutritiva SNCR1 (SN) o con la solución de levaduras 1000 células/ml (S05).

Ensayos de crecimiento en sistema hidropónico de raíz flotante

En sistemas hidropónicos de raíz flotante se utilizaron plantas de *L. sativa* de 4 hojas verdaderas. El sistema se irrigó durante 30 días con la solución nutritiva (control, SNCR2), con la solución de levaduras (S05, 1000 células/ml) o con la solución nutritiva inoculada con la solución de levaduras S05 (1000 células/ml). Luego se realizó un recambio de todas las soluciones traspasando todas las plantas a una nueva solución nutritiva (SNCR2) por un periodo de 30 días.

Análisis del desarrollo vegetal

Análisis de raíces

Las plantas de *E. vesicaria* y *A. thaliana* cultivadas en fibra de coco se cosecharon a los 21 y 14 días respectivamente, y se fotografiaron. Se cuantificó el crecimiento de la raíz principal y las raíces laterales mediante el programa de procesamiento de imágenes FIJI (Weigel y Glazebrook, 2002; Malamy y Benfey 1997, Schindelin, et al., 2012). Se analizó el área foliar de plantas de *L. sativa* de 15 y 60 días crecidas en sistema hidropónico de raíz flotante

(Weigel y Glazebrook, 2002). El sistema radicular de cada una de las plantas se fotografió y se cuantificó el área radicular mediante el programa de procesamiento de imágenes FIJI (IJ1.46r) (Schindelin, et al., 2012)

Análisis del área foliar y verdor

Se analizó el área foliar y el verdor de las hojas de plantas de *L. sativa* de 15 y 60 días crecidas en sistema hidropónico de raíz flotante (Weigel y Glazebrook, 2002). Cuatro hojas de cada una de las plantas se escanearon (CannonScan lide 60). Se cuantificó el área foliar mediante el programa de procesamiento de imágenes FIJI (IJ1.46r) (Schindelin, et al., 2012) y se realizó un análisis sobre del color de las hojas de lechuga con el software CIELAB (Yam y Papadakis, 2004).

Análisis estadísticos

Los valores indicados corresponden a valores medios \pm el error estándar de al menos 3 experimentos independientes. Se evaluaron 17 plantas de *E. vesicaria*, 21 plantas de *Arabidopsis thaliana* y 4 plantas de *L. sativa* para cada condición experimental. En los ensayos de germinación, la estimación de las diferencias estadísticamente significativas entre el control y el tratamiento con la levadura se realizó mediante el test de Mann-Whitney, con un intervalo de confianza del 95 %. Los datos obtenidos de los ensayos de largo del hipocótilo (mm) y de la raíz principal (mm), el número de raíces laterales, el área radicular (mm²), el área foliar (mm²) y el verdor de las hojas (UA) se analizaron mediante ANOVA, test de comparación múltiple Tukey, con 95 % de intervalo de confianza. Para ello se utilizó el programa GraphPad Prism (GraphPad Prism, 2007).

RESULTADOS

Identificación y caracterización química de las levaduras

Los análisis realizados sobre la identificación de la levadura comercial S05 mediante análisis bioinformático BLAST (Boratyn, et al., 2013) evidenciaron un 98.8 % de homología con la levadura *Saccharomyces cerevisiae* cepa J14 (GenBank ID: KY606270.1).

El estudio del metabolismo nitrogenado de la levadura *S. cerevisiae* reveló un porcentaje mayor al 10 % para el ácido glutámico en g/100 g de proteína. Para los aminoácidos ácido aspártico, valina, glicina, fenilalanina, tirosina, lisina y leucina los porcentajes fueron entre 5 y 10 %; para isoleucina, prolina, treonina, alanina, arginina, hidroxiprolina los porcentajes fueron entre 1 y 5 %. El resto de los aminoácidos se encontraron en valores menores al 1 % (Figura 1).

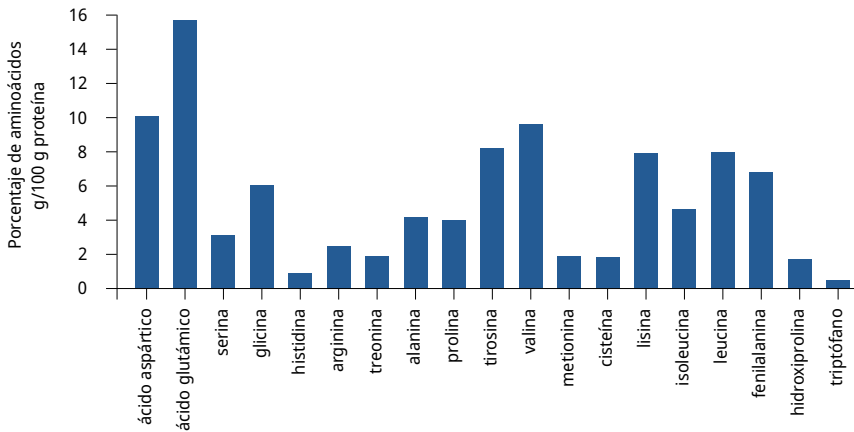


FIGURA 1. Determinación del contenido de aminoácidos de la levadura S05 (porcentaje de aminoácidos/100 g proteínas).

En la siguiente Tabla 1 se observa la determinación de aniones y cationes de la muestra de levadura *S. cerevisiae*.

TABLA 1. Concentración en ppm de macronutrientes principales encontrados en las cenizas de la levadura S05.

Levadura S05	ppm
Nitrógeno	4.5
Potasio	310
Calcio	40
Magnesio	70
Sulfatos	56.6

Análisis de tasa de germinación y crecimiento vegetal

Se evaluó la tasa de germinación y el crecimiento de plántulas de *E. vesicaria* y *A. thaliana* en sustrato de cultivo hidropónico frente al tratamiento con la levadura *S. cerevisiae*. La tasa de germinación de las semillas de *E. vesicaria* y *A. thaliana* tratadas con *S. cerevisiae* no presentó diferencias significativas respecto al tratamiento control (solución nutritiva, SN) (Figura 2).

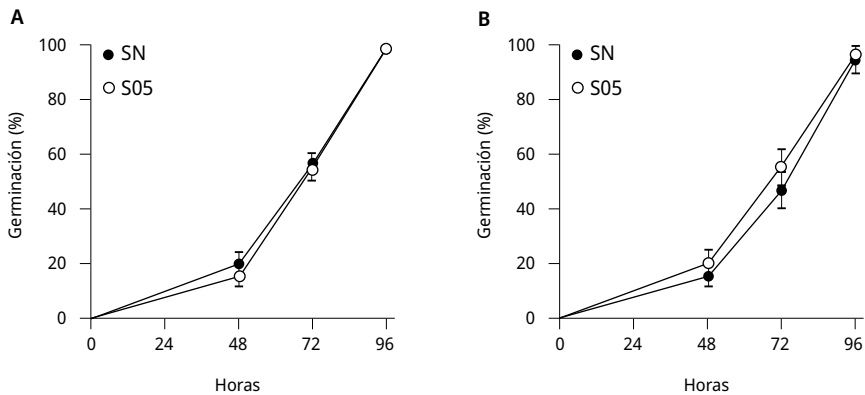


FIGURA 2. Tasa de germinación de semillas de *A. thaliana* y *E. vesicaria* durante 96 horas. Porcentaje (\pm SE) de semillas germinadas a las 48, 72 y 96 h luego de la siembra de A) *E. vesicaria* y B) *A. thaliana*. Se realizaron 2 experimentos independientes, $n \geq 11$. Mann-Whitney test, intervalo de confianza 95 %.

En base a los resultados obtenidos en el análisis del proceso de germinación *in vitro*, se analizó la acción promotora del crecimiento vegetal de la levadura *S. cerevisiae* en plántulas de *E. vesicaria* y *A. thaliana* en almácigos. Los tratamientos con las soluciones de levaduras estimularon el crecimiento de la raíz principal con diferencias significativas respecto al control (SN) para ambas especies de las plántulas analizadas (Figura 3C-D). El tratamiento con *S. cerevisiae* aumentó un 42.5 % el crecimiento de la raíz de *E. vesicaria* y un 70.6 % el largo de la raíz primaria de *A. thaliana*. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas en el tamaño de los hipocótilos en ninguna de las plántulas analizadas respecto al control.

Se analizó el número de raíces laterales de *E. vesicaria* crecidas en almácigos. Se observó un aumento significativo en el número de las raíces laterales luego del tratamiento con la solución de *S. cerevisiae* respecto a las plántulas control (SN) (Figura 3E).

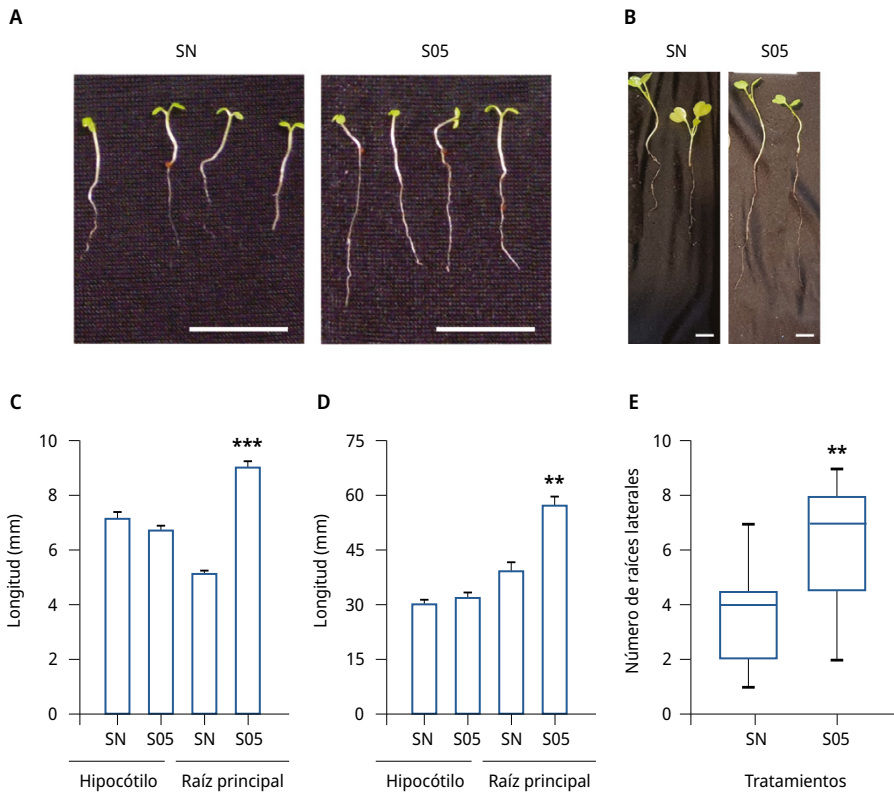


FIGURA 3. Caracterización morfológica de plántulas de *A. thaliana* y *E. vesicaria* crecidas en almácigos en sustrato de cultivo hidropónico. Imágenes de plántulas de A) *A. thaliana* de 14 días de edad y B) *E. vesicaria* de 21 días de edad, crecidas en fibra de coco y tratadas con solución nutritiva, SNCR1 (SN) o con solución de levaduras S05 1000 células/ml (S05). C) Longitud en mm (\pm SE) de hipocótilos y de la raíz principal de *A. thaliana*. D) Longitud en mm (\pm SE) de hipocótilos y de la raíz principal de *E. vesicaria*. Se realizaron tres experimentos independientes, $n > 34$. Los asteriscos indican diferencias significativas respecto al correspondiente control de cada tratamiento (*) = $P \leq 0.01$, (**) = $P \leq 0.001$ (test de t), (***) = $P \leq 0.0001$. E) Número de raíces laterales (\pm SE) de *E. vesicaria* para cada uno de los tratamientos mencionados. Se realizaron tres experimentos independientes, $n > 8$. Los asteriscos indican diferencias significativas respecto al control (SN) (***) = $P \leq 0.001$. ANOVA, test de comparación múltiple Tukey, 95 % intervalo de confianza. Barra 10 mm.

La evidencia presentada hasta el momento permite inferir que la levadura utilizada *S. cerevisiae* cepa J14 presenta características favorables como organismo promotor del crecimiento vegetal para su uso en almácigos en sustrato de cultivo hidropónico. Los resultados en *E. vesicaria* y *A. thaliana* demuestran que los efectos estimulantes del desarrollo son independientes de la especie.

Con el objetivo de explorar la aplicación de *S. cerevisiae* en el sistema de cultivo hidropónico de raíz flotante, se analizó el crecimiento y desarrollo de plantas de *L. sativa* bajo el tratamiento con la solución de levaduras durante 60 días.

(S05) y solución nutritiva inoculada con la solución levaduras S05 (SN+S05). Se realizaron 2 experimentos independientes, $n = 4$. Los asteriscos indican diferencias significativas respecto al correspondiente control de cada tratamiento (*) = $P \leq 0.05$. ANOVA, test de comparación múltiple Tukey, 95 % intervalo de confianza. Barra = 5 cm.

Estos resultados indican un potencial uso de la levadura *S. cerevisiae* como estimulador del desarrollo en plantas de *L. sativa* crecidas bajo el sistema de cultivo hidropónico.

DISCUSIÓN

Este trabajo indica un potencial efecto promotor del desarrollo radicular por parte de la levadura *S. cerevisiae* cepa J14 en plantas de *A. thaliana*, *E. vesicaria* y *L. sativa*. La aplicación de *S. cerevisiae* cepa J14 en cultivo hidropónico representa una estrategia de sostenibilidad basada en los principios de circularidad y una alternativa a los productos sintéticos. En línea con estos resultados, se ha descrito el efecto promotor del crecimiento vegetal por parte de *S. cerevisiae* en plantas de *Solanum lycopersicum* (tomate) y *Saccharum officinarum x spontaneum* (caña de azúcar) crecidas en suelo suplementado con *S. cerevisiae* (Lonhienne, et al., 2015). En dicho trabajo, las plantas de tomate cultivadas en presencia de levadura aumentaron la biomasa de las raíces en un 56 % en comparación con los controles cultivados sin suplemento de levadura. Del mismo modo, las plantas de caña de azúcar tratadas con levadura viva mostraron un 47 % más de biomasa en las raíces en relación con los controles. Similares reportes de la acción promotora del crecimiento radicular por levaduras se presentan en los trabajos de Cloete y otros (2009) y Amprayn y otros (2012) en plantas de *Agathosma betulina* y *Oryza sativa*, respectivamente. Paradiso y otros (2017) han demostrado que la aplicación de PGPM produce un aumento significativo en el desarrollo vegetal, la actividad fotosintética y el rendimiento de las semillas en cultivo hidropónico respecto a plantas sin inocular. Dichos autores han utilizado un consorcio comercial conteniendo bacterias, levaduras, micorrizas y *Trichoderma* en el cultivo hidropónico de *Glycine max*. En este sentido sería interesante estudiar el tratamiento de asociaciones entre la levadura *S. cerevisiae* y bacterias u hongos benéficos en el crecimiento de las plantas cultivadas en el sistema hidropónico.

En el presente trabajo se analizó la composición de aminoácidos y minerales de las soluciones de levaduras. En relación con los primeros, la concentración resultó mayor para los aminoácidos aspártico, glutámico, serina, histidina, arginina y prolina, y menor para el resto de los aminoácidos estudiados en comparación con otra levadura tipo *S. cerevisiae* usada comúnmente en la fabricación de cerveza artesanal conocida como S04 (datos no publicados). Para el caso de los minerales analizados, las concentraciones obtenidas en las levaduras resultaron menores a las de las soluciones nutritivas convencionales en casi todos los macronutrientes, excepto para el magnesio. A pesar de ello, a la luz de los resultados, las levaduras residuales de la producción de cerveza artesanal poseen potencial nutritivo para su uso en cultivo hidropónico en comparación con la composición convencional de la fórmula de Resh (Resh, 2015). En el presente trabajo se observó una mayor calidad radicular y foliar en las plantas inoculadas con *S. cerevisiae*. Asimismo, se observó un aumento significativo en el color del tejido

fotosintético de las hojas de las plantas de *L. sativa* tratadas con solución nutritiva inoculada con *S. cerevisiae* respecto al tratamiento sin inocular. Hay reportes que demuestran que el tratamiento con levaduras incrementa el contenido nutricional vegetal. Joshi y otros (2018) reportaron el uso de *S. cerevisiae* en el cultivo de forraje hidropónico para alimentación de animales de granja. Ensayos realizados por Bedolla-Torres y otros (2015) demostraron que la irrigación de los géneros de levaduras *Debaryomyces*, *Candida* y *Yarrowia* incrementó el contenido nutricional del forraje verde hidropónico de *Zea mays*.

Por otro lado, el trabajo realizado por Abdul y Hussein (2020) informa que el mecanismo biológico de risofagia podría explicar el efecto observado en la promoción del crecimiento vegetal por parte de la levadura *S. cerevisiae* en plantas de *L. sativa* en cultivo hidropónico. Bajo el sistema de cultivo hidropónico demostraron que las células de levadura se adhieren alrededor de las células de la raíz de *L. sativa*, donde posteriormente son fagocitadas por estas mismas y digeridas para obtener sustancias nutritivas. Sin embargo, se han reportado otros mecanismos por los cuales las levaduras tienen la capacidad de promover el desarrollo vegetal, entre ellos se destacan la producción de fitohormonas, aminoácidos, NH_3 , solubilización de fosfato inorgánico y zinc, y la captura de hierro a través de sideróforos (Amprayn, et al., 2012; Freimoser, et al., 2019; Nutaratat, et al., 2014). Las levaduras han sido descritas como potentes antagonistas de varios patógenos vegetales. En las revisiones realizadas por los autores Freimoser y otros (2019) y Mukherjee y otros (2020) se examina la aplicación agrícola de la levadura *S. cerevisiae* y se destaca la escasez de estudios sobre los mecanismos de control biológico tanto para usos en el suelo como en sistemas hidropónicos. Queda mucho por revelar y se requieren investigaciones referidas a los posibles mecanismos biológicos mediante los cuales *S. cerevisiae* cepa J14 estimula el desarrollo de la radícula; como así también estudios que indiquen los posibles mecanismos de control biológico de *S. cerevisiae*, generando oportunidades para el desarrollo de aplicaciones comerciales. Los resultados observados bajo las condiciones experimentales de nuestro estudio abren una puerta para futuros desarrollos agronómicos relacionados a la producción de bioestimulantes a partir de subproductos y su uso en cultivo hidropónico.

REFERENCIAS

- Abdul Ameer, M. A. y Hussein, H. F., 2020. Induction of Rhizophagy by yeast *Saccharomyces cerevisiae* in roots of lettuce *Lactuca sativa* roots of lettuce *Lactuca sativa*. En: *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1664(1), 012116. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1664/1/012116>
- Abhilash, P.C., Dubey R.K., Tripathi, V., Gupta, V.K. y Singh, H.B., 2016. Plant growth-promoting microorganisms for environmental sustainability. En: *Trends Biotechnol.*, 34(11), pp.847-850. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2016.05.005>
- Abhilash, P.C., Tripathi, V., Edrisi, S.A. Gupta, V.K. y Singh, H.B., 2019. Sustainability of crop production from polluted lands. En: *Energ. Ecol. Environ.*, 1, pp.54-65. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40974-016-0007-x>
- Amprayn, K., Rose, M. T., Kecskés, M., Pereg, L., Thanh, H. y Kennedy, I.R., 2012. Plant growth promoting characteristics of soil yeast (*Candida tropicalis* HY) and its

- effectiveness for promoting rice growth. En: *Appl. Soil Ecol.*, 61, pp.295-299.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.11.009>
- AOAC International, 1984. *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 14a ed.
Washington: AOAC. Official Method 2.062.
- AOAC International, 1998. *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 15a ed.
Washington: AOAC. Official Method 942.05.
- Baras, T., 2018. *DIY hydroponic gardens: how to design and build an inexpensive system for growing plants in water*. Beverly: Cool Springs Press. ISBN-10: 0760357595.
- Bedolla-Torres, M. H., Palacios, A., Palacios, O. A., Choix, F. J., Jesús F. De, Valle A., López, D.R., Luis, J., Villavicencio, E., Luna, R. De, Trujillo, A. G., Avila Serranod, N. Y. y Ortega Pérez, R., 2015. La irrigación con levaduras incrementa el contenido nutricional del forraje verde hidropónico de maíz. En: *Rev Argent Microbiol.*, 47(3), pp. 236-244.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ram.2015.04.002>
- Bekuma, A., 2019. Nutritional benefit and economic value of hydroponics fodder production technology in sustainable livestock production against climate change – a mini-review. En: *Adv. Appl. Sci.*, 4(1), pp.23-25.
- Bewley, J. D. y Black M. eds., 1982. *Physiology and biochemistry of seeds in relation to germination. Vol. 1. Development, germination and growth*. Berlin: Springer Verlag. ISBN: 978-3-642-68643-6.
- Boratyn, M. G., Camacho, C., Cooper, P. S., Coulouris, G., Fong, A., Ma, N., Madden, T. L., Matten, W.T., McGinnis, S. D., Merezuk, Y., Raytselis, Y., Sayers, R.W., Tao, Ye J. y Zaretskaya, I., 2013. BLAST: a more efficient report with usability improvements. En: *Nucleic Acids Research*, 41(1), pp. 29–33, DOI: <https://doi.org/10.1093/nar/gkt282>
- Cloete, K. J., Valentine, A. J., Stander, M. A., Blomerus, L. M. y Botha, A., 2009. Evidence of symbiosis between the soil yeast *Cryptococcus laurentii* and a sclerophyllous medicinal shrub, *Agathosma betulina* (Berg.) Pillans. En: *Microb Ecol.*, 57(4), pp. 624-32.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00248-008-9457-9>
- Compant, S., Samad, A., Faist, H. y Sessitsch, A. A review on the plant microbiome: Ecology, functions and emerging trends in microbial applications. En: *J. Adv.*, 19, pp. 29–37.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.03.004>
- El-Tarabily, K. A. y Sivasithamparam, K., 2006. Potential of yeasts as biocontrol agents of soil-borne fungal plant pathogens and as plant growth promoters. En: *Mycoscience*, 47, pp. 25–35. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10267-005-0268-2>
- Falih, A. M. y Wainwright, M., 1995. Nitrification, S-oxidation and P-solubilization by the soil yeast *Williopsis californica* and by *Saccharomyces cerevisiae*. En: *Mycol Res*, 99(2), pp. 200-204. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(09\)80886-1](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(09)80886-1)
- Freimoser, F. M., Paula, M., Mejia, R., Tilocca, B. y Migheli, Q., 2019. Biocontrol yeasts: mechanisms and applications. En: *World J Microbiol Biotechnol*, 35(10), pp.154.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2728-4>
- Glick, B. R., 2012. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. En: *Scientifica*, ID 963401. DOI: <https://doi.org/10.6064/2012/963401>
- Gómez Alonso, S., Gutiérrez, I. H. y García-Romero, E., 2007. Simultaneous HPLC Analysis of Biogenic Amines, amino acids and ammonium ion as aminoenone derivatives in wine and beer samples. En: *J. Agric. Food Chem.*, 55(3), pp. 608-613.
DOI: <https://doi.org/10.1021/jf062820m>






- GraphPad, 2007. *Prism*. Vers. 1992-2007 5.01. San Diego: GraphPad Software, Inc.
- Hardoim, P. R., van Overbeek, L. S., Berg, G., Pirttilä, A. M., Compant, S. y Campisano, A. 2015. The hidden world within plants: ecological and evolutionary considerations for defining functioning of microbial endophytes. En: *Microbiol Mol Biol Rev*, 79(3), pp. 293-320. DOI: <https://doi.org/10.1128%2FMMBR.00050-14>
- Joshi, M., Vaishnav, C. S. y Sharma, S. K., 2018. Economical analysis of feeding hydroponics maize fodder with and without supplementation of probiotic (*Saccharomyces Cerevisiae*) in gir calves. En: *Int. J. Sci. Environ. Technol*, 7(3), pp. 809-814. ISSN 2278-3687
- Kurtzman, C. P. y Robnett, C. J., 1997. Identification of clinically important ascomycetous yeasts based on nucleotide divergence in the 59 end of the large-subunit (26S) ribosomal DNA gene. En: *J. Clin. Microbiol*, 35(5), pp. 1216-1223. DOI: <https://doi.org/10.1128/jcm.35.5.1216-1223.1997>
- Lonhienne, T., Mason, M. G., Raganm M. A., Hugenholtz, P., Schmidt y S., Paungfoo-Ionhienne, C., 2015. Yeast as a biofertilizer alters plant growth and morphology. En: *Crop Sci.*, 54(2), pp.785-790. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.07.0488>
- Malamy, J. E. y Benfey, P.N., 1997. Organization and cell differentiation in lateral roots of *Arabidopsis thaliana*. En: *Development*, 124(1), pp. 33-44. DOI: <https://doi.org/10.1242/dev.124.1.33>
- Martínez-Mate, M. A., Martín-Gorri, B., Martínez-Álvarez, V., Soto-García, M., Maestre-Valero, J. F. y 2018. Hydroponic system and desalinated seawater as an alternative farm-productive proposal in water scarcity areas: energy and greenhouse gas emissions analysis of lettuce production in southeast Spain. En: *J Clean Prod*, 172, pp.1298-310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.275>
- Marulanda, C. e Izquierdo, J., 2003. *La huerta hidropónica popular* [En línea]. Santiago: FAO. [Consulta: 1 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/ah501s/ah501s.pdf>
- Mukherjee, A., Verma, J. P. y Hesham, A. E., 2020. Yeast a potential bio-agent: future for plant growth and postharvest disease management for sustainable agriculture. En: *Appl Microbiol Biotechnol Yeast*, 104(4), pp. 1497-1510. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10321-3>
- Naamala, J. y Smith, D. L., 2020. Relevance of plant growth promoting microorganisms and their derived compounds, in the face of climate change. En: *Agronomy*, 10(8), pp. 1179. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10081179>
- Nassar, A., El-Tarabily, K. A. y Sivasithamparam, K., 2005. Promotion of plant growth by an auxin-producing isolate of the yeast *Williopsis saturnus* endophytic in maize (*Zea mays* L.) roots. En: *Biol Fertil Soils*, 42, pp. 97-108. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-005-0008-y>
- Nutaratat, P., Srisuk, N., Arunrattiyakorn, P. y Limtong, S., 2014. Plant growth-promoting traits of epiphytic and endophytic yeasts isolated from rice and sugar cane leaves in Thailand. En: *Fungal Biol*, 118(8), pp. 683-94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2014.04.010>
- Olajire, A. A., 2012. The brewing industry and environmental challenges. En: *J Clean Prod*, 256, 102817. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.003>

- Paradiso, R., Arena, C., Miccom V. De, Giordano, M., Aronne, G. y Pascale, S. De., 2017. Changes in leaf anatomical traits enhanced photosynthetic activity of soybean grown in hydroponics with plant growth-promoting. En: *Front. Plant Sci*, 8, 674. DOI: <http://doi.org/10.3389/fpls.2017.00674>
- Philippot, L., Raaijmakers, J. M., Lemanceau, P., Putten, W. H. V. D., 2013. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. En: *Rev. Microbiol.*, 11, pp. 789-799. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrmicro3109>
- Ramayo Cruz, P., 2018. *Aprovechamiento de subproductos derivados de la elaboración de cerveza artesanal. Trabajo presentado para optar al título del máster universitario en gestión de calidad y trazabilidad en alimentos de origen vegetal* [En línea]. Badajoz: Universidad de Extremadura. [Consulta: 1 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://dehesa.unex.es/handle/10662/8081>
- Resh, M. H., 2015. *Hydroponics for the home grower*. Boca Ratón: CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/b18069>
- Rincón Reyna, J. F., Rincón Reyna, P. G., Torres Maravilla, E., Mondragón Rojas, A. G., Sánchez Pardo, M. E., Arana Cuenca, A., Ortiz Moreno, A., Jiménez García, E., 2016. Caracterización fisicoquímica y funcional de la fibra de mesocarpio de coco (*Cocos nucifera* L.) [En línea]. En: *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1(2), pp. 279-284. [Consulta: 1 de noviembre de 2022]. Disponible en: <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume1/2/3/49.pdf>
- Sambo, P., Nicoletto, C., Giro, A., Pii, Y., Valentinuzzi, F., Mimmo, T., Lugli, P., Orzes, G., Mazzetto, F., Astolfi, S., Terzano, R. y Cesco, S., 2019. Hydroponic solutions for soilless production systems: issues and opportunities in a smart agriculture perspective. En: *Front. Plant Sci*, 10, pp.923. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00923>
- Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., Preibisch S., Rueden C., Saalfeld S., Schmid B, Tinevez J-Y, White DJ., Hartenstein V, Eliceiri K., Tomancak P. y Cardona, A., 2012. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. En: *Nat Methods*, 9, pp. 676-682. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmeth.2019>
- Smart, K., Chambers, M., Lambert, I., Jenkins, C. y Smart, C.A., 1999. Use of methylene violet staining procedures to determine yeast viability and vitality. En: *J Am Soc Brew Chem*, 57(1), pp. 18-23. DOI: <https://doi.org/10.1094/ASBCJ-57-0018>
- Villanueva, N. S., 2021. Mecanismos de inducción de rizobios para reducir el estrés por sequía en las leguminosas. En: *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 23(4), pp. 258-265. DOI: <https://dx.doi.org/10.18271/ria.2021.263>
- Weigel, D. y Glazebrook, J., eds., 2002. *Arabidopsis: a laboratory manual*. New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press. ISBN-10: 0879695730.
- Yam, K. L. y Papadakis, S. E., 2004. A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. En: *J. Food Process Eng.*, 61, pp.137-142. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00195-X)

Tecnofuncionalidad de harinas integrales de maíces andinos (*Zea Mays*) nativas y extrudidas

Technofunctionality of native and extruded Andean maize (*Zea Mays*) whole-grain flours

Tecnofuncionalidade das farinhas integrais de milho andino extrusado e nativo (*Zea Mays*)

-  **RITA MARISOL MIRANDA** (1)
-  **NATALIA ESTER DOMÍNGUEZ** (1)
-  **MARÍA ALEJANDRA GIMÉNEZ** (1)
-  **MANUEL OSCAR LOBO** (1)
-  **NORMA CRISTINA SAMMÁN** (1)

(1) Centro Interdisciplinario de Investigaciones en Tecnologías y Desarrollo Social para el NOA (CIITeD)-CONICET. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy, San Salvador de Jujuy, Argentina.

RECIBIDO: 19/10/2021 → APROBADO: 10/8/2022 ✉ rmmiranda@conicet.gov.ar

RESUMEN

Los granos andinos tienen gran potencial de transformación en nuevos productos, pero su aprovechamiento integral es un desafío tecnológico. El objetivo de este trabajo fue modificar las propiedades tecnofuncionales de las harinas integrales de maíces andinos Capia, Bolita y Chulpi para obtener harinas que potencialmente mejoren la calidad de los panes sin gluten. Las harinas se extrudieron en un extrusor monotornillo, usando un diseño ortogonal incompleto con tres niveles de temperatura, humedad y velocidad de tornillo. Se determinó la composición proximal de las harinas integrales nativas. En las harinas nativas y extrudidas se midió el índice de absorción de agua (IAA), el índice de solubilidad en agua (ISA), la capacidad de retención de aceite (CRO), la capacidad de retención de agua (CRA) y el poder de hinchamiento (PH). Los maíces andinos presentaron diferencias significativas en su composición. La mayor parte de la variabilidad de datos se debió a la humedad y la temperatura de extrusión. En general, las muestras de maíz Capia y Bolita tuvieron un comportamiento similar, presentando mayores IAA, CRA y PH a altas humedades y temperaturas; el ISA fue mayor a bajas humedades. La CRO no presentó diferencias significativas entre tratamientos. Las harinas integrales extrudidas

de maíz Capia y Bolita con altos IAA, CRA y PH, a 120 °C, 25% H y 80 rpm, podrían mejorar la consistencia de las masas y la suavidad de panes sin gluten.

Palabras clave: granos andinos, extrusión, propiedades tecnofuncionales.

ABSTRACT

Andean grains have great potential for transformation into new products, but their comprehensive utilization is a technological challenge. The objective of this work was to modify the techno-functional properties of whole-grain flours of the Capia, Bolita and Chulpi Andean maize races by extrusion to obtain flours that potentially improve the quality of gluten-free bread. The flours were extruded in a single screw extruder, using an incomplete orthogonal design with three levels of temperature, moisture and screw speed. The proximal composition of the native whole-grain flours was determined. In native and extruded flours were determined the water absorption index (IAA), water solubility index (ISA), oil absorption capacity (CRO), water binding capacity (CRA) and swelling volume (PH). The extruded Andean maize whole-grain flours presented significant differences in their composition. Most of the variability of data was due to moisture and extrusion temperature. In general, the samples of Capia and Bolita maize had a similar behavior, presenting higher IAA, CRA and pH at high moistures and temperatures; the ISA was higher at low moistures. The CRO did not show significant differences between treatments. Extruded whole-grain flour of Capia and Bolita maize with high IAA, CRA and PH, such as those obtained in the extrusion condition of 120 °C, 25% H y 80 rpm, could improve the consistency of doughs and the softness of gluten-free breads.

Keywords: Andean grains, extrusion, techno-functional properties.

RESUMO

Os granos andinos têm grande potencial de transformação em novos productos, mas em sua aprovação integral e um desafio tecnológico. O objetivo deste trabalho foi modificar as propriedades tecnofuncionais de farinhas integrais de milho andino Capia, Bolita e Chulpi por extrusão para obter farinhas que potencialmente melhoram a qualidade de pães sem glúten. As farinhas foram extrusadas em um extrusor mono-rosca, usando um desenho ortogonal incompleto com três níveis de temperatura, umidade e velocidade de rosca. Foi determinada a composição proximal das farinhas integrais nativas. Nas farinhas nativas e extrusadas, determinaram-se o índice de absorção da água (IAA), o índice de solubilidade em água (ISA), a capacidade de retenção de óleo (CRO), a capacidade de retenção de água (CRA) e poder de inchamento (PH). Os milhos andinos apresentaram diferenças significativas em suas composições. A maior parte da variabilidade dos dados foi devido à umidade e temperatura de extrusão. De maneira geral, as amostras de milho Capia e Bolita tiveram um comportamento semelhante, apresentando maiores IAA, CRA e PH em altas umidades e temperaturas; o ISA foi maior em baixas umidades. O CRO não mostrou diferenças significativas entre os tratamentos. As farinhas integrais extrusadas de milho Capia e Bolita com alto IAA, CRA e PH, como as obtidas na condição de extrusão

de 120 °C, 25% H y 80 rpm, poderiam melhorar a consistência das massas e a maciez dos pães sem glúten.

Palavras-chave: grãos andinos, extrusão, propriedades tecno-funcionais.

INTRODUCCIÓN

Los granos andinos como el maíz tienen gran potencial de transformación en nuevos productos sin gluten porque no contienen las proteínas que lo forman (Giménez, et al., 2015). En Jujuy se cultivan diferentes razas de maíces andinos como Capia, Amarillo de ocho rayas, Chulpi, Pisingallo o Pisincho y Morocho, de mayor demanda comercial, y otras menos conocidas como Culli, Garrapatillo, Bolita, Altiplano y Lanudo (Cámara Hernández y Arancibia Cabezas, 2007). El endospermo del grano de maíz representa entre el 82-85% de su peso seco y está compuesto principalmente por almidón (FAO, 1993). El grano de maíz puede contener dos tipos de endospermo: vítreo (duro-traslúcido) y harinoso (blando-opaco), y la proporción de cada uno de ellos depende de la raza y variedad del maíz (Zhang y Xu, 2019). La incidencia de la variabilidad genética -derivada de la domesticación ancestral- sobre las propiedades fisicoquímicas es determinante en el uso culinario que se les da a los granos andinos y/o a su procesamiento posterior (Salvador-Reyes y Clerici, 2020).

El consumo de harinas integrales derivadas de estos granos aumentaría la ingesta de micro y macronutrientes, además de fibra dietaria y compuestos bioactivos con beneficios nutricionales y funcionales (Caputo, et al., 2015; Paesani, et al., 2020). Sin embargo, la utilización de harinas integrales sin gluten suele dificultar la obtención de productos aireados y suaves como los de panadería, y la granulometría de las harinas tiene un efecto importante sobre estos defectos (Salvador-Reyes y Clerici, 2020; Luo, et al., 2021).

La extrusión-cocción es un tratamiento capaz de modificar las propiedades fisicoquímicas de las harinas integrales sin gluten o las harinas adicionadas con fibra, dependiendo de la intensidad del proceso (Tsatsaragkou, et al., 2016). El contenido de humedad de la alimentación, el tiempo de residencia, la velocidad y configuración del tornillo, su geometría, la temperatura del barril y la composición química del material, entre otros, son factores a tener en cuenta en el diseño y optimización del proceso de extrusión (Moscicki, 2011). En la extrusión de harinas de cereales, el almidón es el componente que juega el papel más importante debido a que los cambios que sufre, como la gelatinización, fusión y fragmentación, afectan la reología del material y la textura del producto final (Roman, et al., 2018). Otros cambios importantes registrados durante la extrusión incluyen la desnaturalización de proteínas, la inactivación de enzimas, la formación de almidón resistente y la formación de complejos amilosa-lípido y proteína-lípido, entre otros (De Pilli y Alessandrino, 2020). La extrusión también es capaz de inducir cambios en la relación de fibra soluble/insoluble e incluso aumentar el contenido de fibra dietética total, razón por la cual sus efectos sobre la funcionalidad de las harinas son un tema de estudio actual (Zhong, et al., 2019). Trabajos como los de Clerici y otros (2009) y Gómez y Martínez (2016) indicaron mejoras de las propiedades panaderas de harinas sin gluten por aplicación de la extrusión, entre ellas las características texturales de sus masas y productos horneados. Comettant-Rabanal y otros (2020) han aplicado esta

tecnología en harinas integrales de diversas fuentes con buenos resultados en la calidad de los panes formulados.

Las propiedades tecnofuncionales, como el índice de absorción de agua y el índice de solubilidad en agua de harinas integrales sin gluten, son frecuentemente utilizadas para caracterizar el material extrudido (Ding, et al., 2005). La intensidad del tratamiento de extrusión produce cambios considerables sobre esas propiedades, según las condiciones utilizadas (Sarifudin y Assiry, 2014). Por ejemplo, el índice de absorción de agua y el índice de solubilidad en agua suelen ser indicadores de la degradación de macromoléculas de las harinas, como el almidón y las proteínas, luego de la extrusión (Kharat, et al., 2019). Además, las propiedades de hidratación de las harinas pueden estar relacionadas con la variedad del cultivo. Cornejo y Rosell (2015) encontraron diferencias significativas en la capacidad de retención de agua, el índice de absorción de agua y el poder de hinchamiento de harinas de variedades de arroz de grano corto. La capacidad de retención de aceite y el poder de hinchamiento son medidas asociadas, por su afinidad química, a la concentración de fibra dietaria (Wang, et al., 2016), lo cual resultaría de utilidad en la caracterización de harinas integrales sometidas a extrusión. Además, la capacidad de retención de aceite se relaciona con el grado de cocción de las harinas extrudidas, ya que este tratamiento promueve la exposición de zonas hidrófobas de las proteínas que pueden interactuar con los lípidos (Espinosa-Ramírez, et al., 2021). Estas propiedades en conjunto podrían constituir una herramienta rápida y económica para la selección de las condiciones de extrusión de harinas integrales con potencial para la elaboración de productos de panadería.

El objetivo de este trabajo fue modificar las propiedades tecnofuncionales de harinas integrales de tres razas de maíces andinos mediante extrusión para obtener harinas potencialmente mejoradoras de la calidad de panes sin gluten.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron tres razas de maíces andinos, Capia, Chulpi y Bolita, provenientes de Ocumazo, en el departamento de Humahuaca, en la provincia de Jujuy, Argentina. Estos maíces se molieron en molino de martillos hasta obtener harinas integrales con un tamaño de partículas inferior a 710 μm .

Las harinas integrales se extrudieron en un extrusor Brabender (KE 19/25D) monotornillo con relación de compresión 3:1, boquilla de 3 mm, a temperaturas de 100, 120 y 140 °C, humedades de 15, 20 y 25%, velocidades de tornillo de 80, 100 y 120 rpm, usando un diseño factorial incompleto (Zhong, et al., 2019).

Se determinó la composición proximal de las harinas integrales nativas por métodos AOAC: humedad (AOAC Internacional, 2005a); proteínas (AOAC Internacional, 2005b); lípidos (AOAC Internacional, 2005c); cenizas (AOAC Internacional, 2005d). Los carbohidratos totales se determinaron por diferencia. En las harinas nativas y extrudidas se determinaron algunas propiedades tecnofuncionales que se detallan a continuación.

Índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA)

Se determinaron por el método de Anderson y otros (1969). Se pesaron 2,5 g de cada muestra en tubos de centrífuga. Luego se adicionaron 30 mL de agua destilada y se colocaron en baño termostático a 30 °C por 15 min con agitación, se enfriaron a temperatura ambiente y se centrifugaron a 3000 rpm por 10 min. Se registraron los pesos de los residuos o geles obtenidos en los tubos de centrífuga. Los sobrenadantes obtenidos se colocaron en cajas de Petri y se evaporaron a 110 °C para determinar los sólidos solubles. Los IAA e ISA se calcularon según las ecuaciones:

$$\text{IAA (g/g)} = \frac{W_r}{W_i} \quad (1)$$

$$\text{ISA (\%)} = \frac{W_r}{W_i} \times 100 \quad (2)$$

Donde: w_i es el peso de la harina; w_r , el peso del gel; y w_s , el peso del sobrenadante seco.

Capacidad de retención de aceite (CRO), capacidad de retención de agua (CRA) y poder de hinchamiento (PH)

Se determinaron por los métodos de Raghavendra y otros (2004 y 2006) con ligeras modificaciones (Wang, et al., 2016).

La capacidad de retención de agua se determinó pesando 1 g de cada muestra seca. Las muestras se hidrataron con 30 mL de agua destilada en tubos de centrífuga y se dejaron en reposo a 20 °C. Después de 18 h, se centrifugaron a 3000 g durante 20 min. Luego se decantó el sobrenadante y se pesó el residuo. La CRA de las muestras se determinó con la siguiente ecuación:

$$\text{CRA (g/g)} = \frac{W_a}{W_i} \quad (3)$$

Donde: w_a es el peso del agua retenida; w_i , el peso de la harina.

Para la determinación de la capacidad de retención de aceite se pesaron 500 mg de muestra. La muestra se mezcló con 10 mL de aceite de girasol refinado en un tubo de centrífuga. Se dejó equilibrar durante la noche a 20 °C y luego se centrifugó a 10000 g durante 30 minutos. Luego se decantó el sobrenadante y se pesó el residuo.

$$\text{CRO (g/g)} = \frac{W_o}{W_i} \quad (4)$$

Donde: w_o es el peso del aceite retenido; w_i es el peso de la harina.

Para la determinación del poder de hinchamiento se pesaron 200 mg de cada muestra en una probeta graduada y se hidrató con 10 mL de agua destilada a 20 °C durante 18 h, finalmente se registró el volumen ocupado por la muestra. El PH se determinó con la siguiente ecuación:

$$PH \text{ (mL/g)} = \frac{V_s}{W_i} \quad (5)$$

Donde: v_s es el volumen ocupado por la harina después de la hidratación; w_i , el peso de la harina.

Los datos se analizaron utilizando el software InfoStat (Di Rienzo, et al., 2008). Los resultados se presentan como la media aritmética de tres repeticiones \pm la desviación estándar. La diferencia entre medias se evaluó por análisis de varianza (ANOVA) de un factor, seguida por la prueba ad-hoc de Tukey con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Los datos sobre las propiedades tecnofuncionales de las harinas extruidas se resumieron en un análisis de componentes principales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La composición proximal de las harinas integrales de maíces andinos se muestra en la Tabla 1, donde se observa que presentaron diferencias significativas en su composición. El maíz Chulpi presentó el menor contenido de carbohidratos y el mayor contenido de proteínas y cenizas. En tanto, el maíz Bolita presentó el menor contenido de lípidos. Los maíces Capia y Bolita presentaron composiciones similares, a excepción del contenido de lípidos, que fue significativamente distinto. Salvador-Reyes y Clerici (2020) señalaron que el contenido de proteínas suele ser superior en las razas de maíces andinos comparadas con el de maíz amarillo comercial. El contenido de grasa de las razas de maíz andino peruano mencionado por estos autores es casi la mitad comparado con los valores obtenidos en este trabajo. Esto podría afectar la tecnofuncionalidad de las harinas tratadas por extrusión, ya que estos lípidos pueden interactuar con la amilosa para formar complejos (Ding, et al., 2005).

TABLA 1. Composición proximal (g/100 g bs)

Componente/Maíz	Capia	Chulpi	Bolita
Proteínas	7,06 \pm 0,13 ^a	9,33 \pm 0,07 ^b	7,09 \pm 0,12 ^a
Lípidos	7,08 \pm 0,56 ^b	7,00 \pm 0,29 ^b	5,41 \pm 0,10 ^a
Cenizas	1,52 \pm 0,04 ^a	1,94 \pm 0,08 ^b	1,62 \pm 0,02 ^a
Carbohidratos	83,64 \pm 0,45 ^b	79,75 \pm 0,35 ^a	84,24 \pm 0,01 ^b

Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

En general, se encontraron diferencias entre las propiedades tecnofuncionales según las condiciones del tratamiento aplicado sobre las harinas, excepto en la CRO (Figuras 1A, 1B y 1C). Las propiedades tecnofuncionales de las harinas extrudidas variaron respecto a las harinas nativas del siguiente modo: el IAA aumentó entre 54,74 (Ch1) y 118,22% (C3); el ISA varió entre -33,20% (C9) y 384,56% (B3); el PH aumentó entre 54,30 (Ch3) y 265,39% (C4); la CRA aumentó entre 195,24 (Ch3) y 415,92% (B5). Todas las harinas integrales tratadas por extrusión tuvieron mayores IAA, PH y CRA respecto a las harinas nativas. Espinosa-Ramírez y otros (2021) y Silvestre-De-León y otros (2020) atribuyen el aumento de las propiedades de hidratación en muestras extrudidas a cambios estructurales en los biopolímeros como la gelatinización del almidón y/o desnaturalización de las proteínas por exposición de sus grupos hidrofílicos. Otros cambios estructurales, como la fragmentación de la fibra insoluble, también pueden contribuir al aumento de la CRA (Chen, et al., 2018). Los valores de ISA de las harinas tratadas variaron respecto a sus harinas nativas: en general aumentaron a bajas humedades de extrusión independientemente de la temperatura. Stephen y Phillips (2006) señalaron la ocurrencia de fenómenos de fragmentación molecular del almidón y su posterior repolimerización ocasionados por efecto de cizallamiento a bajas humedades de extrusión. En el mismo sentido, Sarifudin y Assiry (2014) informaron que el grado de fragmentación del almidón no solo estaría asociado a bajas humedades sino también a temperaturas elevadas por degradación térmica. Las muestras extrudidas de maíz Chulpi en general presentaron los menores incrementos en el IAA, PH y CRA, lo cual podría deberse a que la harina nativa de este maíz tuvo el menor contenido de carbohidratos y por ende, el menor contenido de almidón disponible para gelatinizar. En tanto, los incrementos del ISA de los extrudidos de maíz Chulpi prácticamente no variaron respecto a la harina nativa, a diferencia de las muestras de maíces Capia y Bolita. Algunos autores han señalado que las características morfológicas de los gránulos de almidón propias de la raza o variedad vegetal, como el tamaño y el contenido de amilosa, tienen influencia sobre la gelatinización del almidón y su comportamiento durante la extrusión (Chaudhary, et al., 2008; Narváez-González, et al., 2007).

Se realizó un análisis de componentes principales con las propiedades tecnofuncionales que presentaron diferencias significativas para observar su correlación con las variables de extrusión y la diferenciación por raza de maíz (Figura 2). En el ACP se observó que los componentes 1 (CP1) y 2 (CP2) explicaron el 62,9% de la variabilidad de los datos. La temperatura tuvo mayor influencia en CP1 y la humedad en CP2.

El CP1 estuvo correlacionado positivamente con las variables CRA ($r = 0,91$), IAA ($r = 0,85$) y PH ($0,81$). Los pares CRA-PH ($r = 0,79$) y CRA-IAA ($r = 0,67$) muestran una fuerte correlación. Estos tres parámetros, asociados a los cambios estructurales del almidón, proteínas y fibra, podrían utilizarse en la selección de los parámetros de extrusión de harinas integrales de maíces andinos con potencial para mejorar la calidad de panes sin gluten. Cerón-Fernández y otros (2016) probaron diferentes condiciones de extrusión en harina de quínoa y seleccionaron el IAA como el factor más importante para inferir las condiciones de proceso adecuadas para obtener harinas precocidas de fácil hidratación, solubilización y desarrollo de textura viscoelástica.

En general, las muestras de maíz Capia y Bolita tuvieron un comportamiento similar frente a la extrusión, presentando mayores IAA, CRA y PH a altas humedades y

temperaturas. La similitud de la composición de las muestras nativas de maíz Capia y Bolita podrían explicar en parte estos resultados.

EL CP2 se correlacionó con el ISA ($r = 0,80$). Este parámetro fue mayor a bajas humedades en las muestras extrudidas. Las harinas integrales extrudidas de maíz Chulpi se diferenciaron de las demás harinas extrudidas, principalmente por su alto ISA, el cual era alto en la harina nativa. Debido a los valores bajos de IAA CRA y PH, las muestras de maíz Chulpi se agruparon en la sección izquierda del gráfico ACP.



FIGURA 1. Propiedades tecnofuncionales de maíces andinos: A-Capia (C), B-Chulpi (Ch) y C-Bolita (B). Las muestras sin numeración corresponden a las harinas nativas y las numeradas corresponden a los tratamientos usados: C1, Ch1 y B1:100 °C – 15%H – 80 rpm;

REFERENCIAS

- Anderson, R.A., Conway H.F., Pfeifer V.F. y Griffin E.L., 1969. Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. En: *Cereal Science Today*, 14, pp.4-12. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.19700220408>
- AOAC International, 2005a. *Official methods of analysis of AOAC International*. 18 ed. Gaithersburg: AOAC. Official Method 925.10.
- AOAC International, 2005b. *Official methods of analysis of AOAC International*. 18 ed. Gaithersburg: AOAC. Official Method 920.87.
- AOAC International, 2005c. *Official methods of analysis of AOAC International*. 18 ed. Gaithersburg: AOAC. Official Method 920.39.
- AOAC International, 2005d. *Official methods of analysis of AOAC International*. 18 ed. Gaithersburg: AOAC. Official Method 923.03.
- Cámara Hernández, J. y Arancibia de Cabezas, D., 2007. *Maíces andinos y su uso en la Quebrada de Humahuaca y regiones vecinas (Argentina)*. Buenos Aires: Facultad de Agronomía Universidad de Bs As. ISBN 978-950-29-1011-6.
- Caputo, L., Visconti, A. y De Angelis, M., 2015. Selection and use of a *Saccharomyces cerevisiae* strain to reduce phytate content of wholemeal flour during bread-making or under simulated gastrointestinal conditions. En: *LWT-Food Science and Technology*, 63(1), pp.400-407. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.03.058>
- Cerón-Fernández, C.L., Guerra-Morcillo, I.V., Legarda-Quintero, J.A., Enríquez-Collazos, M.G. y Pismag-Portilla, Y., 2016. Efeito da extrusão sobre as características físico-químicas da farinha de quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*). En: *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), pp.92-99. DOI: [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)92-99](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)92-99)
- Chaudhary, A.L., Miler, M., Torley, P.J., Sopade, P.A. y Halley, P.J., 2008. Amylose content and chemical modification effects on the extrusion of thermoplastic starch from maize. En: *Carbohydrate Polymers*, 74(4), pp.907-913. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.05.017>
- Chen, H., Zhao, C., Li, J., Hussain, S., Yan, S. y Wang, Q., 2018. Effects of extrusion on structural and physicochemical properties of soluble dietary fiber from nodes of lotus root. En: *LWT*, 93, pp.204-211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.03.004>
- Clerici, M.T.P.S., Airolidi, C. y El-Dash, A.A., 2009. Production of acidic extruded rice flour and its influence on the qualities of gluten-free bread. En: *LWT-Food Science and Technology*, 42(2), pp.618-623. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.08.010>
- Comettant-Rabanal, R., De Carvalho, C.W.P., Ascheri, J.L.R., Hidalgo Chávez, D.W. y Germani, R., 2020. Physical, textural and structural properties of gluten-free breads made from extruded whole grain flours [En línea]. En: Universidade Federal de São João del-Rei. *Anais do Congresso on-line Brasileiro de Tecnologia de Cereais e Panificação*. Sete Lagoas, Brasil. Sete Lagoas: Universidade Federal de São João del-Rei. [Consulta: 2 de Julio de 2021]. Disponible en: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1126445>
- Cornejo, F. y Rosell, C.M., 2015. Physicochemical properties of long rice grain varieties in relation to gluten free bread quality. En: *LWT-Food Science and Technology*, 62(2), pp.1203-1210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.050>
- De Pilli, T. y Alessandrino, O., 2020. Effects of different cooking technologies on biopolymers modifications of cereal-based foods: Impact on nutritional and quality

- characteristics review. En: *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(4), pp.556-565. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1544884>
- 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>
- Ding, Q.B., Ainsworth, P., Tucker, G. y Marson, H., 2005. The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks. En: *Journal of Food engineering*, 66(3), pp.283-289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.03.019>
- Espinosa-Ramírez, J., Rodríguez, A., De la Rosa-Millán, J., Heredia-Olea, E., Pérez-Carrillo, E. y Serna-Saldívar, S.O., 2021. Shear-induced enhancement of technofunctional properties of whole grain flours through extrusion. En: *Food Hydrocolloids*, 111, 106400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106400>
- FAO, 1993. *El maíz en la nutrición humana*. Roma: FAO. (Alimentación y nutrición, N° 25). ISBN 92-5-303013-5.
- Giménez, M.A., Gámbaro, A., Miraballes, M., Roascio, A., Amarillo, M., Sarmán, N. y Lobo, M., 2015. Sensory evaluation and acceptability of gluten-free Andean maize spaghetti. En: *J Sci Food Agric.*, 95(1), pp.186-192. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.6704>
- Gómez, M. y Martínez, M.M., 2016. Changing flour functionality through physical treatments for the production of gluten-free baking goods. En: *J. Cereal Sci.*, 67, pp.68-74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.07.009>
- Kharat, S., Medina-Meza, I. G., Kowalski, R. J., Hosamani, A., Ramachandra, C. T., Hiregoudar, S. y Ganjyal, G. M., 2019. Extrusion processing characteristics of whole grain flours of select major millets (foxtail, finger, and pearl). En: *Food and Bioprocess Technology*, 114, pp.60-71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.07.002>
- Luo, S., Yan, X., Fu, Y., Pang, M., Chen, R., Liu, Y., Chen, J. y Liu, C., 2021. The quality of gluten-free bread made of brown rice flour prepared by low temperature impact mill. En: *Food Chemistry*, 348, pp.129032. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129032>
- Moscicki L., 2011. *Extrusion-cooking techniques: applications, theory and sustainability*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag & Co. ISBN: 978-3-527-32888-8.
- Narváez-González, E.D., Figueroa Cardenas, J.D.D., Taba, S., Castaño Tostado, E. y Martínez Peniche, R.A., 2007. Efecto del tamaño del gránulo de almidón de maíz en sus propiedades térmicas y de pastificado. En: *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(3), pp. 269-277. ISSN: 0187-7380.
- Paesani, C., Bravo-Núñez, Á. y Gómez, M., 2020. Effect of extrusion of whole-grain maize flour on the characteristics of gluten-free cookies. En: *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 132(1), pp.109931. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109931>
- Raghavendra, S.N., Rastogi, N.K., Raghavarao, K.S.M.S., y Tharanathan, R.N., 2004. Dietary fiber from coconut residue: effects of different treatments and particle size on the hydration properties. En: *Eur Food Res Technol.*, 218(6), pp.563-567. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-004-0889-2>
- Raghavendra, S.N., Swamy, S.R., Rastogi, N.K., Raghavarao, K.S.M.S., Kumar, S. y Tharanathan, R.N., 2006. Grinding characteristics and hydration properties of coconut

- residue: A source of dietary fiber. En: *Journal of Food Engineering*, 72(3), pp.281-286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.12.008>
- Roman, L., Gomez, M., Hamaker, B.R. y Martinez, M.M., 2018. Shear scission through extrusion diminishes inter-molecular interactions of starch molecules during storage. En: *Journal of Food Engineering*, 238, pp.134-140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.06.019>
- Salvador-Reyes, R. y Clerici, M.T.P.S., 2020. Peruvian andean maize: general characteristics, nutritional properties, bioactive compounds, and culinary uses. En: *Food Research International*, 130, pp.108934. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108934>
- Sarifudin, A., y Assiry, A.M., 2014. Some physicochemical properties of dextrin produced by extrusion process. En: *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13(2), pp.100-106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.02.001>
- Silvestre-De-León, R., Espinosa-Ramírez, J., Heredia-Olea, E., Pérez-Carrillo, E. y Serna-Saldívar, S.O., 2020. Biocatalytic degradation of proteins and starch of extruded whole chickpea flours. En: *Food and Bioprocess Technology*, 13(10), pp.1703-1716. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02511-z>
- Stephen, A.M. y Phillips, G.O., 2006. *Food polysaccharides and their applications*. 2a edición. Boca Raton: CRC Press.
- Tsatsaragkou, K., Protonotariou, S. y Mandala, I., 2016. Structural role of fibre addition to increase knowledge of non-gluten bread. En: *Journal of Cereal Science*, 67, pp.58-67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.10.003>
- Wang, J., Suo, G., de Wit, M., Boom, R.M. y Schutyser, M.A., 2016. Dietary fibre enrichment from defatted rice bran by dry fractionation. En: *Journal of Food Engineering*, 186, pp.50-57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.04.012>
- Zhang, H. y Xu, G., 2019. Physicochemical properties of vitreous and floury endosperm flours in maize. En: *Food Science & Nutrition*, 7(8), pp.2605-2612. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.1114>
- Zhong, L., Fang, Z., Wahlqvist, M.L., Hodgson, J.M., y Johnson, S.K., 2019. Extrusion cooking increases soluble dietary fibre of lupin seed coat. En: *LWT*, 99, pp.547-554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.10.018>

Efecto de la extrusión alcalina en las propiedades fisicoquímicas y funcionales de la harina integral de maíz andino

Effect of alkaline extrusion on the physicochemical and functional properties of the whole andean corn flour

Efeito da extrusão alcalina nas propriedades físico-químicas e funcionais da farinha de milho andino

 NATALIA ESTER DOMÍNGUEZ (1)

 RITA MARISOL MIRANDA (1)

 MARÍA ALEJANDRA GIMÉNEZ (1)

 MANUEL OSCAR LOBO (1)

 NORMA CRISTINA SAMMÁN (1)

(1) Centro Interdisciplinario de Investigaciones en Tecnologías y Desarrollo Social para el NOA (CIITeD)-CONICET. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy, San Salvador de Jujuy, Argentina.

RECIBIDO: 19/10/2021 → APROBADO: 3/11/2022 ✉ ndominguez@ciited.unju.edu.ar

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue estudiar las propiedades tecnofuncionales de la harina de maíz cuzco extrudida alcalina (HMEA), obtenida por el agregado de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en el proceso de extrusión, y compararla con las de una harina de maíz obtenida por un proceso de extrusión tradicional (HME). La harina nativa se acondicionó a humedades de 30, 35, 40 y 45% (p/p) y fue extrudida en un extrusor monotornillo a 80 °C. Para la extrusión alcalina se adicionó 0,25 g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /100 g de harina. El agregado de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en el proceso de extrusión afectó significativamente las propiedades tecnofuncionales de la HMEA, aumentando el índice de solubilidad (ISA), y disminuyendo el índice de absorción de agua (IAA) y la capacidad de retención de aceite (CRA) respecto a la HME. El tratamiento alcalino disminuyó el grado de gelatinización respecto a la HME, obteniendo valores entre 31,80 y 57,90% y aumentando la temperatura de gelatinización de 69 a 73 °C. La firmeza de los geles varió de 0,26 a 0,33 N para HMEA, y de 0,50 a 0,77 N para HME. La extrusión alcalina modificó las propiedades tecnofuncionales de la harina de maíz cuzco, disminuyendo la absorción de agua y controlando el grado de gelatinización, obteniéndose harinas con grado de cocción intermedio.

Palabras clave: harina modificada, grano entero, propiedades tecnofuncionales.

ABSTRACT

The objective of this work was to study the techno-functional properties of alkaline extruded Cuzco corn flour (HMEA) obtained by $\text{Ca}(\text{OH})_2$ addition in the extrusion process and to compare it with those of corn flour obtained by a traditional extrusion process (HME). The native meal was conditioned at moistures of 30, 35, 40 and 45% (w/w) and extruded in a single-screw extruder at 80 °C. For alkaline extrusion, 0.25 g of $\text{Ca}(\text{OH})_2/100$ g of flour was added. The addition of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the extrusion process significantly affected the techno-functional properties of HMEA by increasing the solubility index (WSI), decreasing the water absorption index (WAI) and oil retention capacity (ORC) with respect to those of HME. The alkaline treatment decreased the degree of gelatinization with respect to HMEA, obtaining values between 31.80 and 57.90% and increasing the initial gelatinization temperature from 69 to 73 °C. The gel firmness of the treated flours ranged from 0.26 to 0.33 N and 0.50 to 0.77 N for HMEA and HME respectively. Alkaline extrusion modifies the techno-functional properties of cuzco corn flour by reducing its water absorption and controlling the degree of gelatinization, obtaining flours with an intermediate cooking degree.

Keywords: modified flour, whole grain, techno-functional properties.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi estudar as propriedades tecnofuncionais da farinha de milho cuzco extrudada alcalina (HMEA) obtida por adição de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ no processo de extrusão e compará-la com as da farinha de milho obtida por um processo de extrusão tradicional (HME). A refeição nativa foi condicionada até a humidade de 30, 35, 40 e 45% (p/p) e extrudada numa extrusora de parafuso único a 80 °C. Para a extrusão alcalina, adicionouse 0,25 g de $\text{Ca}(\text{OH})_2/100$ g de farinha. A adição de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ no processo de extrusão afetou significativamente as propriedades tecnofuncionais do HMEA, aumentando o índice de solubilidade (ISA), diminuindo o índice de absorção de água (IAA) e a capacidade de retenção de óleo (ORC) em relação às do HME. O tratamento alcalino diminuiu o grau de gelatinização em relação à HME, obtendo valores entre 31,80 e 57,90% e aumentando a temperatura de gelatinização de 69 para 73 °C. A firmeza dos géis variou entre 0,26 a 0,33 N e 0,50 a 0,77 N para HMEA e HME respectivamente. A extrusão alcalina modifica as propriedades tecnofuncionais da farinha de milho cuzco, diminuindo a absorção de água e controlando o grau de gelatinização, obtendo farinhas com grau de cozimento intermediário.

Palavras-chave: farinha modificada, grão integral, propriedades tecnofuncionais.

INTRODUCCIÓN

Las nuevas tendencias gastronómicas de cocina *gourmet*, en su permanente búsqueda de productos exóticos o pocos conocidos y en su afán de buscar nuevos sabores, favorecen indudablemente la difusión de cultivos andinos originarios. La promoción de estos

cultivos, mediante el uso y agregado de valor, constituye una estrategia de importancia económica para las poblaciones locales.

Los maíces nativos de la Quebrada de Humahuaca y los Valles andinos de Jujuy son una de las principales especies cultivadas de importancia socioeconómica para los pobladores locales y han representado la base de su cultura alimentaria durante siglos.

La aplicación de diferentes procesos tecnológicos que modifiquen las propiedades tecnofuncionales de diferentes harinas de cultivos andinos se ha vuelto un tema de interés, principalmente porque carecen de gluten, por lo que presentan un inconveniente tecnológico a la hora de aplicarlo en la elaboración de alimentos farináceos como pastas y panificados. Esto ha dado lugar a una serie de investigaciones que buscan imitar las propiedades viscoelásticas del gluten. De esta manera se han presentado nuevos usos para varios almidones y harinas no convencionales como la mandioca o yuca (Lorenzo, et al., 2008), la quinoa (Chillo, 2009) y el amaranto (Chillo, 2010; Mariotti, 2011), entre otros.

La extrusión-cocción es uno de los procesos termomecánicos ampliamente usados en la obtención de harinas pregelatinizadas. Es una tecnología muy versátil que provoca cambios estructurales en el almidón y las proteínas de las materias primas. Con este proceso se obtiene una masa constituida por los polímeros del almidón (amilosa y amilopectina), mezclados con gránulos de almidón parcialmente gelatinizados, gránulos intactos, partes de endospermo y lípidos (Contreras-Jiménez, et al., 2016).

El tratamiento de las materias primas almidonosas con reactivos alcalinos, como sales de sodio y calcio, es un método muy usado en países asiáticos y de América Latina (por ejemplo, México) para obtener pastas y masas para tortillas con mejor elasticidad y firmeza (Guo, et al., 2017; Contreras-Jiménez, et al., 2016). La adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ incrementa el aporte de calcio y permite la interacción del ion divalente con el almidón, impartiendo propiedades funcionales deseadas a las harinas. Para los habitantes andinos del Norte Argentino, los maíces forman parte de su dieta habitual y utilizan el tratamiento alcalino como un pretratamiento para eliminar el pericarpio del maíz.

La extrusión alcalina es una buena alternativa para obtener harinas precocidas de maíces de la Quebrada Jujeña con propiedades tecnológicas mejoradas para ser aplicadas en la elaboración de pastas y panificados. Si bien existen trabajos de investigación acerca del uso de esta tecnología sobre el maíz (Contreras-Jiménez, et al., 2016; Bello-Pérez, et al., 2002; Gutiérrez-Dorado, et al., 2008), aun no fue estudiada su aplicación en la raza de maíz cuzco. Por otro lado, el tratamiento de extrusión alcalina realizado podría ser aplicado para obtener harinas que pueden utilizarse en la formulación de masas libres de gluten, sistemas que por lo general requieren la formación de estructuras estables que aporten extensibilidad y cohesividad adecuadas. Conocer el efecto de la tecnología de extrusión alcalina en las propiedades tecnofuncionales de la harina de maíz cuzco permitirá obtener una alternativa en el uso de estas harinas modificadas. Por ello, el objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto de la extrusión alcalina (con agregado de $\text{Ca}(\text{OH})_2$) sobre las propiedades tecnofuncionales de la harina integral de maíz cuzco (HMEA) y compararlas con las de una harina de maíz obtenida por un proceso de extrusión tradicional (HME).

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

Se utilizó maíz blanco andino raza cuzco provisto por la cooperativa CAUQUEVA (Maimará, provincia de Jujuy, Argentina) y por el INTA-IPAF NOA (Maimará). Fue cosechado y posteriormente secado a temperatura ambiente de la zona (26 °C de día y 10 °C de noche, temperaturas promedio). La molienda integral de los granos de maíz se llevó a cabo en un molino de martillo (Polymix PX- MFC- 90 D Kinematica) hasta obtener una harina con tamaño de partícula menor a 450 µm, tamizada en malla N° 40 (ASTM-E-11-61).

Composición química

Se determinaron los contenidos de macronutrientes del maíz cuzco y las harinas precocidas obtenidas. Se emplearon los métodos analíticos AOAC: humedad (AOAC Internacional, 2005a), proteínas (AOAC Internacional, 2005b) y lípidos (AOAC Internacional, 2005c). La dureza del endospermo se determinó mediante la técnica del peso hectolitro (Vázquez-Carrillo, 2003).

El pH se midió con un medidor de pH calibrado. Las muestras (10 g) se suspendieron en 100 mL de agua destilada hervida. La suspensión se agitó (1.500 rpm, 25 °C, 20 min) utilizando un agitador orbital (modelo 21704-10; Cole Parmer International) (Gutiérrez-Dorado, et al., 2008).

Acondicionamiento de harinas

Doce horas antes de cada ensayo de extrusión se pesaron muestras de 200 g de harina, a la cual se le agregó agua destilada según los niveles de humedad elegidos para el proceso (30, 35, 40 y 45%), verificada por técnica de humedad (AOAC Internacional, 2005a). Para la extrusión alcalina, a las muestras se les adicionó 0,25 g de Ca(OH)₂/100 g de harina de maíz. Cada muestra se mezcló durante 3 min y luego se almacenó en una bolsa de polietileno, por 12 h en refrigeración (5 °C).

Extrusión

El proceso de extrusión se llevó a cabo en un equipo Extrusor Brabender (KE 19/25D, Alemania) monotornillo para obtener harina de maíz extruida (HME) y harina de maíz extruida alcalina (HMEA). Se utilizó un tornillo con una relación de longitud a diámetro 19:1 y una relación de compresión nominal 2:1. La velocidad de alimentación de las muestras acondicionadas fue de 20 rpm. La velocidad del tornillo fue de 60 rpm. El equipo extrusor manejó tres zonas de calentamiento: la primera zona (zona de alimentación) a 40 °C, la segunda (zona de compresión) a 60 °C y finalmente la tercera a 80 °C (zona de cocimiento). Los extrudidos se obtuvieron por una boquilla de 3 mm de diámetro y se recogieron en bandeja para su posterior secado.

Las muestras extrudidas se secaron en estufa a 30 °C durante 12 h. Luego se molieron en molino de martillo y se pasaron a través de una malla N° 60 (ASTM-E-11-61) para seleccionar partículas con un tamaño $\leq 250 \mu\text{m}$.

Índice de solubilidad en agua (ISA), índice de absorción de agua (IAA) y capacidad de retención de aceite

Se determinaron los índices ISA y IAA en la HME y HMEA según el procedimiento de Anderson y otros (1969), con ligeras modificaciones: se mezcló una muestra de 2,5 g con 10 mL de agua destilada en un tubo de centrifuga de 50 mL a 25 °C. La suspensión se agitó durante 30 min y se centrifugó a 5000 rpm durante 30 min. El sobrenadante se colocó en una placa de aluminio tarado y se evaporó en un horno de convección a 105 °C durante 12 h. Se registró el peso del gel, así como el precipitado, y el IAA se expresó como g de gel/g de muestra seca.

El ISA se determinó utilizando la metodología informada por Anderson y otros (1969), utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{ISA} = \text{PSS}/\text{PM} \quad (1)$$

Donde: PSS es el peso del material soluble en el sobrenadante y PM es el peso inicial de la muestra.

La capacidad de retención de aceite (CRA) de las muestras se determinó según el método descrito por Ahmed y otros (2016). Brevemente, se transfirieron 10 mL de aceite de girasol a 100 mg de muestra en un tubo de centrifuga de 50 mL, y se agitó. La mezcla resultante se centrifugó a 1500 g durante 30 min. La CRA se expresó como g de aceite absorbido/g de muestra a 30 °C.

Todas las determinaciones se realizaron por triplicado.

Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas de las muestras extrudidas fueron analizadas utilizando calorimetría diferencial de barrido. Los termogramas fueron obtenidos con un DSC (DSC Q800 TA Instruments, Delaware, USA). El equipo fue calibrado con indio, usando una cápsula vacía como referencia. Las muestras fueron preparadas directamente en las cápsulas; se pesaron 2-3 mg de muestra y se adicionó agua destilada para que la concentración final de sólidos fuera del 20%. Luego fueron calentadas desde 40 °C a 120 °C a una velocidad de 10 °C/min en presencia de nitrógeno. Fueron determinadas la temperatura de pico (T_p), y la entalpía ($\Delta H/g$) a partir del área correspondiente a cada pico y grado de gelatinización (DG).

$$\text{DG} (\%) = \frac{(\Delta H \text{ harina nativa} - \Delta H \text{ harina extrudida})}{\Delta H \text{ harina nativa}} \times 100 = (I) \quad (2)$$

Firmeza de geles

Para determinar la firmeza de los geles de HME y HMEA se preparó una dispersión de harina/ agua (3,5 \pm 0,01 g en 25 \pm 0,01 g de agua destilada). La dispersión se calentó a ebullición en una

placa calefactora con agitación magnética constante con el fin de alcanzar una hidratación homogénea. Las muestras se calentaron durante 8 min a la misma intensidad de la placa calefactora (temperatura aproximada de 93 °C) (Kumar, 2019). Las soluciones de harina se vertieron en recipientes cilíndricos (35 mm de diámetro interno, 65 mm de altura), se dejaron reposar durante 25 min a temperatura ambiente y se almacenaron a 4 °C durante 24 h para conseguir la estabilización del gel. Cada gel se hizo por triplicado.

El análisis de textura se realizó según Martínez y otros (2015). La determinación de la textura de los geles se realizó a temperatura ambiente en un analizador de textura TA-XT2 Stable micro texture analyser (Stable Microsystems Ltd, Godalming, UK), equipado con software Texture Exponente Lite para Windows. Se realizó un ciclo de compresión usando una probeta cilíndrica de 5 mm de diámetro (P5), se aplicó a una velocidad constante de la cruceta de 0,5 mms⁻¹ con una profundidad de 10 mm de la muestra, seguidos de un retorno a la posición original. Se obtuvo la curva de fuerza-tiempo que se utilizó para calcular el valor del parámetro de textura: dureza (la fuerza máxima observada durante el ciclo de compresión). Todas las mediciones se realizaron por triplicado.

Análisis estadístico

Se utilizó un diseño factorial completamente aleatorizado con 2 factores, el primero de 2 niveles y el segundo de 4 niveles (Tabla 1). Los datos obtenidos se trataron estadísticamente mediante análisis de varianza, mientras que las medias fueron comparadas por el LSD Prueba de Fisher a un nivel de significancia de 0,05, usando en ambos casos el software estadístico INFOSTAT-Versión 2017 (Di Rienzo, et al., 2017). Todos los experimentos se realizaron por triplicado y se informaron los valores medios ± la desviación o error estándar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Composición química

La Tabla 1 muestra la composición química de las harinas HME y HMEA a los distintos niveles de acondicionamiento de humedad. La humedad de las harinas HME y HMEA varió entre el 9,68 y 10,37%. Los valores de humedad encontrados fueron similares a los obtenidos por Contreras-Jiménez y otros (2016). No se observaron diferencias significativas en el contenido proteico y el contenido de lípidos libres disminuyó significativamente ($p < 0,05$) en la HMEA en comparación con la HME. Los valores de la HMEA a 30 y 35% de humedad de acondicionamiento fueron significativamente mayores ($p < 0,05$) a los encontrados para la HME obtenida en las mismas condiciones. Esto puede deberse a que parte de los lípidos durante la extrusión forman complejos amilosa-lípido, y en presencia del agente alcalino, el Ca interacciona con el almidón disminuyendo la posibilidad de interacción amilosa-lípido (Ibarra-Mendivil, et al., 2008). La HME presentó valores de pH entre 6,26 a 6,44, mientras que el agregado de hidróxido de calcio incrementó significativamente ($p < 0,05$) el pH de las muestras de la HMEA.

TABLA 1. Composición química de las harinas tratadas.

Muestras	Humedad de acondicionamiento (%)	Humedad de harina (g/100g)	Proteína (g/100g)	Lípido libres (g/100g)	pH
HME	30	10,13 ± 0,13 ^{ab}	11,09 ± 0,03 ^a	1,33 ± 0,04 ^d	6,44 ± 0,01 ^c
	35	10,29 ± 0,54 ^b	11,08 ± 0,02 ^a	1,35 ± 0,00 ^d	6,26 ± 0,04 ^a
	40	10,14 ± 0,28 ^{ab}	11,09 ± 0,01 ^a	1,55 ± 0,07 ^c	6,27 ± 0,02 ^a
	45	10,37 ± 0,07 ^b	11,07 ± 0,01 ^a	1,28 ± 0,04 ^b	6,33 ± 0,01 ^b
HMEA	30	10,20 ± 0,16 ^{ab}	11,11 ± 0,01 ^a	1,68 ± 0,04 ^d	7,18 ± 0,06 ^g
	35	9,87 ± 0,09 ^{ab}	11,07 ± 0,01 ^a	1,65 ± 0,00 ^d	6,80 ± 0,03 ^e
	40	10,08 ± 0,11 ^{ab}	11,10 ± 0,02 ^a	1,50 ± 0,06 ^c	6,58 ± 0,02 ^d
	45	9,68 ± 0,25 ^a	10,98 ± 0,01 ^a	1,10 ± 0,04 ^a	6,90 ± 0,02 ^f
Harina Nativa		9,35 ± 0,07 ^{ab}	11,08 ± 0,19 ^a	4,08 ± 0,11 ^e	6,4 ± 0,02 ^c

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$).
 Los valores se expresan en mg/100g base seca.

Propiedades funcionales

Índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad de agua (ISA) y capacidad de retención de aceite (CRA)

El IAA está relacionado con el grado de cocimiento de las harinas. Los valores de IAA de la HMEA presentaron diferencias significativas ($p < 0,005$) comparadas con la HME (Figura 1A). El rango encontrado para la HMEA fue de 2,21 a 2,58 kg gel/kg harina, mientras que la HME presentó valores entre 3,11 y 3,46 kg gel/ kg harina. Estos valores estuvieron dentro del rango informado por Contreras-Jiménez y otros (2016) para harinas procesadas en condiciones similares. Los valores mayores encontrados en la HME pueden ser debido a su mayor grado de gelatinización (Castillo, et al., 2009).

El índice de solubilidad en agua indica la cantidad de sólidos disueltos por el agua cuando una muestra de harina se somete a un exceso de este líquido; indica también el grado de dextrinización del almidón durante la extrusión (González, et al., 2006). El índice de solubilidad se vio afectado significativamente ($p < 0,05$) por los niveles de humedad y el tratamiento alcalino. El rango de ISA (Figura 1B) encontrado para la HMEA (15,58 a 21,59%) fue significativamente mayor al de las muestras de HME (5,81 a 9,78%). Los mayores valores se encontraron para muestras con un nivel de acondicionamiento de 45% de humedad. Los valores de ISA para la HMEA fueron mayores a los valores reportados por Contreras-Jiménez y otros (2016) para maíz duro, posiblemente debido al tipo de maíz. Los granos de maíz blandos tienen un empaque suelto de los gránulos de almidón, en comparación con los granos duros que tienen una matriz proteica muy densa alrededor de los gránulos de almidón (Salvador-Reyes, et al., 2021). Por otro lado,

en este trabajo se ha empleado harina integral de maíz, por lo tanto, el tratamiento térmico alcalino produjo una hidrólisis y solubilización de los componentes estructurales del pericarpio (Bello-Pérez, et al., 2002), aumentando los valores de ISA. La CRA (Figura 1C) para la HMEA fue significativamente menor ($p < 0.05$) que la de la HME; este comportamiento es esperable ya que la HMEA presentó mayor ISA, indicando mayores componentes que se solubilizan en agua y disminuyendo componentes que retienen aceite (Valencia y Román, 2006).

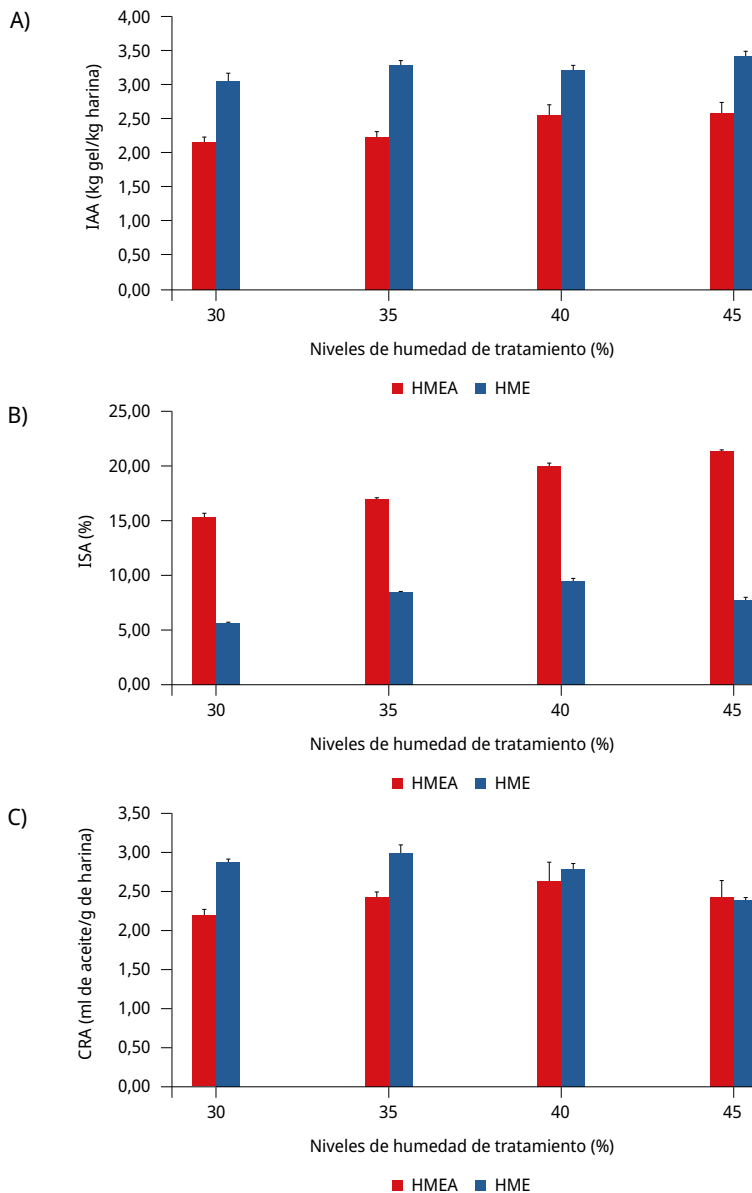


FIGURA 1. A) Índice de solubilidad en agua (ISA). B) Índice de absorción de agua (IAA). C) Capacidad de retención de aceite (CRA).

Propiedades térmicas por DSC

En la Tabla 2 se presentan la temperatura de pico (T_p) y la entalpía de gelatinización (ΔH). La T_p varió de 68,27 a 72,28 °C y de 71,11 a 73,08 para la HME y HMEA respectivamente. Los parámetros térmicos encontrados en la HMEA fueron similares a los informados por Gutiérrez-Dorado y otros (2008); la mayor temperatura pico de gelatinización se observó en las muestras de HMEA y a mayor humedad (73,08 °C). De acuerdo con Pineda-Gómez y otros (2011), la interacción de los iones de calcio y el almidón desplaza el pico de gelatinización a temperaturas más altas. Este aumento de la T_p podría producirse debido a un cambio en la estructura molecular de la harina, puesto que la presencia de Ca promueve la formación de puentes entre los grupos OH de los monómeros de glucosa con el calcio, lo que lleva a una estructura más compleja que necesita mayor temperatura para romperse (Pineda-Gómez, et al., 2010). Para el menor contenido de humedad de extrusión se observaron grados de gelatinización de 31,80 y 61,40% para la HMEA y HME respectivamente. Estos resultados demuestran que los valores de ISA obtenidos para la HMEA no estarían solo asociados al grado de gelatinización, sino también a la solubilidad de otros componentes con el tratamiento alcalino. El grado de gelatinización disminuyó a partir del 40% de humedad, lo que indicaría que a partir de este contenido de agua la misma actúa como plastificante, reduciendo el efecto del cizallamiento mecánico y el calentamiento durante la extrusión (Liu, et al., 2017).

TABLA 2. Propiedades térmicas de las harinas tratadas.

	Humedad de tratamiento (%)	T_p (°C)	ΔH (J/gr)	DG (%)
HME	30	68,8 ± 2,7 ^a	2,1 ± 0,1 ^{cd}	61,4 ± 1,2 ^{cd}
	35	72,3 ± 0,9 ^{ab}	1,5 ± 0,0 ^a	71,3 ± 0,9 ^f
	40	72,3 ± 0,5 ^{ab}	1,7 ± 0,2 ^{ab}	68,4 ± 0,5 ^{ef}
	45	68,3 ± 0,0 ^a	1,9 ± 0,1 ^{bc}	64,7 ± 0,0 ^{de}
HMEA	30	71,1 ± 1,5 ^{ab}	3,7 ± 0,5 ^{cd}	31,8 ± 2,2 ^a
	35	72,6 ± 1,8 ^{ab}	2,3 ± 0,0 ^d	57,9 ± 0,8 ^{bc}
	40	72,9 ± 1,3 ^{ab}	1,8 ± 0,2 ^e	67,5 ± 0,5 ^{ef}
	45	73,1 ± 0,6 ^b	2,6 ± 0,1 ^f	52,4 ± 1,8 ^b
Harina integral de maíz andino		68,42	5,44	

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$). T_p (temperatura de pico); ΔH (entalpía de gelatinización); DG (grado de gelatinización).

Firmeza de geles

La firmeza de geles varió de 0,26 a 0,33 N y 0,50 a 0,77 N para la HMEA y HME respectivamente, encontrándose diferencias significativas entre los tratamientos

($p < 0,05$) (Figura 2). La menor firmeza de los geles de la HMEA puede deberse a que los iones de calcio interrumpen la cristalización de las moléculas de almidón durante el enfriamiento del gel, lo que conduce a redes de gel debilitadas (Cornejo y Rosell, 2015).

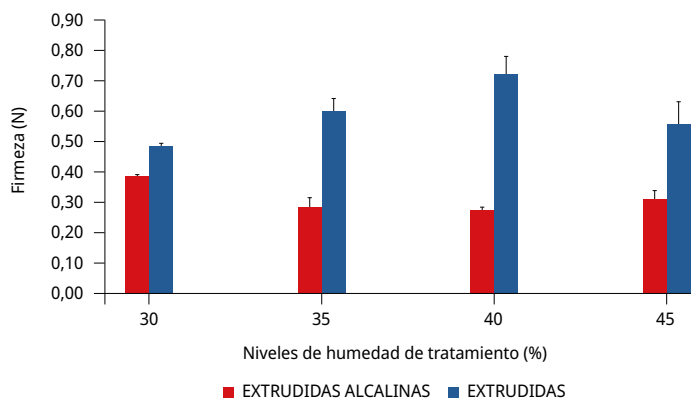


FIGURA 2. Firmeza de geles de las harinas extrudidas.

CONCLUSIÓN

El agregado de calcio a la extrusión convencional de harina de maíz cuzco modifica sus propiedades tecnofuncionales, obteniéndose harinas caracterizadas por presentar un grado de cocción intermedio o menor a los obtenidos con una extrusión convencional. Por sus propiedades, tienen potenciales usos en sistemas de masas y/o en la elaboración de postres y salsas, sistemas que requieren menor firmeza en sus geles con mejor estabilidad a la retrogradación debido a la presencia de compuestos como complejos amilosa-lípido. El conocimiento acerca del comportamiento tecnofuncional de las harinas integrales nativas obtenidas por tratamiento térmico alcalino permite sugerir posibles usos en la elaboración de alimentos farináceos libre de gluten.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se llevó a cabo con financiamientos otorgados por la Secretaría de Ciencia y Técnica y Estudios Regionales (SeCTER) de la Universidad Nacional de Jujuy, y el Consejo Nacional de Investigación de Ciencia y Tecnología (CONICET).

REFERENCIAS

- Ahmed, J., Hasan, Al., Yasir A. y Arfat, A., 2016. Effect of particle size on compositional, functional, pasting and rheological properties of commercial water chestnut flour. En: *Food Hydrocolloids*, 52, pp.888-895.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.08.028>

- Anderson Conway, H.F., Pfeifer, V. F. y Griffin, Jr., 1969. Gelatinization of corn grits by roll and extrusion-cooking. En: *Cereal Science Today*, 14, pp.4-12.
- AOAC International, 2005a. *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 18a ed. Gaithersburg: AOAC. Official Method 925.10.
- AOAC International, 2005b. *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 18a ed. Gaithersburg: AOAC. Official Method 920.87.
- AOAC International, 2005c. *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 18a ed. Gaithersburg: AOAC. Official Method 920.39.
- Bello-Pérez, L. A., Osorio-Díaz, P., Agama-Acevedo, E., Núñez S. y Paredes López, O. 2002. Propiedades químicas, fisicoquímicas y reológicas de masas y harinas de maíz nixtamalizado [En línea]. En: *Agrociencia*, 36(3), pp.319-328. [Consulta 11 de Noviembre de 2022]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30236305>
- Castillo, V.K.C., Ochoa, M.L.A., Figueroa, C.J.D., Delgado, L.E., Gallegos, I.J.A. y Morales, C.J., 2009. Efecto de la concentración de hidróxido de calcio y tiempo de cocción del grano de maíz (*Zea mays* L.) nixtamalizado, sobre las características fisicoquímicas y reológicas del nixtamal. En: *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 59(4), pp.425-432. ISSN 0004-0622.
- Chillo, S., Civica, V., Lannetti, M., Suriano, N., Mastromatteo, M. y Del Nobile, M.A., 2009. Properties of quinoa and oat spaghetti loaded with carboxymethylcellulose sodium salt and pregelatinized starch as structuring agents. En: *Carbohydrate Polymers*, 78, pp.932-937. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.07.013>
- Chillo, S., Civica, V., Lannetti, M., Mastromatteo, M., Suriano, N. y Del Nobile, M.A., 2010. Influence of repeated extrusions on some properties of nonconventional spaghetti. En: *Journal of Food Engineering*, 100, pp.329-335. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.04.018>
- Contreras-Jiménez, B., Gaytán-Martínez, M., Morales-Sánchez, E., Figueroa, J., Pless, E., González-Jasso, E., Méndez-Montealvo, G. y Velazquez, G., 2016. Effect of tempering time, Ca(OH)² concentration and particle size on the rheological properties of extruded corn flour. En: *Cereal Chemistry Journal*, 94, pp.230-236. DOI: <https://doi.org/10.1094/CCHEM-03-16-0058-R>
- Cornejo, F. y Rosell, C.M., 2015. Physicochemical properties of long rice grain varieties in relation to gluten free bread quality. En: *LTW- Food Science and Technology*, 62, pp.1203-12102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.050>
- Di Rienzo, J.A., Balzarini, Mónica, González, Laura, Casanoves, Fernando, Tablada, Margot y Robledo, Carlos, 2017. *InfoStat versión 2017* [En Línea]. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba. [Consulta:12 de octubre de 2021]. Disponible en: <http://www.infostat.com.ar>
- González, R.J., Torres, R.L. y De Greef, D.M., 2006. El arroz como alimento: el grano y la harina, parámetros de caracterización y de calidad. En: Benavides, R., ed. *El arroz: su cultivo y sustentabilidad en Entre Ríos*. Capítulo 1. Entre Ríos: Univ. Nac. de Entre Ríos y Univ. Nac. del Litoral. pp.19-52. ISBN 950-698-167-1.
- Gutiérrez-Dorado, R., Ayala-Rodríguez, A. E., Milan-Carrillo, J., López-Cervante, J., Garzón-Tiznado, J. A., López-Valenzuela, J. A., Paredes-López, O. y Reyes-Moreno, C., 2008. Technological and nutritional properties of flours and tortillas from nixtamalized and

- extruded quality protein maize (*Zea mays* L.). En: *Cereal Chemistry*, 85(6), pp.808-816.
DOI: <https://doi.org/10.1094/CCHEM-85-6-0808>
- Guo, N., Wei, X. y Zhu, K., 2017. The impact of protein cross-linking induced by alkali on the quality of buckwheat noodles. En: *Food Chemistry*, 221(15), pp.1178-1185.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.041>
- Ibarra-Mendivil, M.H., Gallardo-Navarro, Y.T., Torres, P.I. y Ramírez Wong, B., 2008. Effect of processing conditions on instrumental evaluation of nixtamal hardness of corn. En: *Journal of Texture Studies*, 39(3), pp.252-266.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2008.00141.x>
- Kumar, P.S., Saravanan, A., Sheeba, N. y Uma, S., 2019. Structural, functional characterization and physicochemical properties of green banana flour from dessert and plantain bananas (*Musa* spp.). En: *LWT*, 116, 108524.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108524>
- Liu, C., Zhang, Y., Liu, W., Wan, J., Wang, W. y Wu, L., 2017. Physicochemical and structural properties of pregelatinized starch prepared by improved extrusion cooking technology. En: *Journal of Cereal Science*, 175(1), pp.265-272.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.07.084>
- Lorenzo, G., Zaritzky, N. y Califano, A., 2008. Optimization of non-fermented gluten-free dough composition based on rheological behavior for industrial production of "empanadas" and pie-crusts. En: *Journal of Cereal Science*, 48, pp.224-231.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.09.003>
- Mariotti, M., Iametti, S., Cappa, C., Rasmussen, P. y Lucisano, M., 2011. Characterisation of gluten-free pasta through conventional and innovative methods: evaluation of the uncooked products. En: *Journal of Cereal Science*, 53(3), pp.319-327.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.02.001>
- Martínez, M.M., Macías, A.K., Belorio, M.L. y Gómez, M., 2015. Influence of marine hydrocolloids on extruded and native wheat flour pastes and gels. En: *Food Hydrocolloids*, 43, pp.172-179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.05.012>
- Pineda-Gómez, P., Coral, D.F., Arciniegas, M.L., Rosales-Rivera, A. y Rodríguez-García, M.E., 2010. Papel del agua en la gelatinización del almidón de maíz: estudio por calorimetría diferencial de barrido. En: *Revista Ingeniería y Ciencia*, 6(11), pp.129-141. ISSN 1794-9165.
- Pineda-Gómez, P., Coral, D.F., Arciniegas, M.L., Rosales-Rivera, A. y Rodríguez-García, M.E., 2011. Estudio de las propiedades térmicas de harinas de maíz producidas por tratamiento térmico-alcálico. En: *Revista Ingeniería y Ciencia*, 7(14), pp.119-142. ISSN 1794-9165.
- Salvador-Reyes, R., Rebellato, A. P., Pallone, J. A. L., Ferrari, R. A. y Clerici, M. T. P. S., 2021. Kernel characterization and starch morphology in five varieties of Peruvian Andean maize. En: *Food Research International*, (140), 110044
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110044>
- Valencia, F.E. y Román, M.O., 2006. Caracterización fisicoquímica y funcional de tres concentrados comerciales de fibra dietaria. En: *Vitae*, 13(2), pp.54-60. ISSN 0121-4004.
- Vázquez Carrillo, M.G., Guzmán Báez, L., Andrés García, J.L., Márquez Sánchez, F. y Castillo Merino, J., 2003. Calidad de grano y tortillas de maíces criollos y sus retrocruzas. En: *Revista Fitotecnia Mexicana*, 26(4), pp.231-238. ISSN: 0187-7380.

Experiencia de aplicación de microorganismos efectivos nativos (MEN) para el tratamiento de aguas residuales

Application of effective microorganisms from native origin (MEN) for wastewater treatment

Ensaio de aplicação de microorganismos efetivos nativos (MEN) para o tratamento de águas residuais

 **GIMENA ECHEVERRIBORDA** (1)

 **FEDERICO MESA** (1)

 **GUILLERMO CHALAR** (2)

 **CARLA KRUK** (2) (3)


 **CLAUDIA PICCINI** (4)

(1) Cooperativa Entrebichitos, Canelones, Uruguay.

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

(3) Departamento de Modelización, Estadística de Datos e Inteligencia Artificial, Centro Universitario Regional del Este, Universidad de la República, Rocha, Uruguay.

(4) Departamento de Microbiología, Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable, Montevideo, Uruguay.

RECIBIDO: 5/8/2022 → APROBADO: 2/12/2022  cpiccini@iibce.edu.uy

RESUMEN

La contaminación fecal es uno de los principales problemas de calidad del agua dulce a nivel mundial. Una de las soluciones propuestas para este problema es el tratamiento de los efluentes a nivel doméstico o local con preparados biológicos tales como los microorganismos efectivos nativos (MEN). En este trabajo se evaluó la eficacia de un preparado de MEN producido en Uruguay para disminuir la contaminación fecal en efluentes domésticos. Para ello se realizaron experimentos a distintas escalas: desde *in vitro* hasta en pozos sépticos de viviendas y un tramo del arroyo Malvín (*in situ*), combinando preparado líquido con sólido y empleando a los coliformes fecales (CF) y la materia orgánica particulada como indicadores del rendimiento. En el laboratorio y en los pozos sépticos, los CF disminuyeron significativamente luego de 8 semanas de aplicación. En el arroyo Malvín se observó una disminución de los CF y una recuperación visual del curso de agua, con un aumento de la transparencia y el oxígeno disuelto. Los resultados de este trabajo sugieren que la aplicación de MEN en aguas residuales domiciliarias

constituye una aproximación promisorio para reducir la contaminación fecal de los efluentes domésticos y enfatizan la necesidad de cambiar los hábitos de construcción de los pozos sépticos.

Palabras clave: aguas residuales, tratamiento, pozos sépticos, coliformes fecales.

ABSTRACT

Fecal contamination is one of the main freshwater quality problems worldwide. One of the proposed solutions for this problem is the treatment of the effluents at domestic or local level with microbial consortia such as effective microorganisms from native origin (MEN in Spanish). In this work we evaluated the ability of a MEN formulation produced in Uruguay to reduce fecal contamination in domestic effluents. To achieve this, experiments were carried out at different scales, from *in vitro* to domestic septic tanks and in a section of the Malvín stream (*in situ*), combining liquid with solid MEN formulation and using fecal coliforms (FC) and particulate organic matter as performance indicators. Both at the laboratory level and in the septic tanks, CF decreased significantly after 8 weeks of application. In the Malvín stream, a decrease in CF and a visual recovery of the water course were observed, with increased transparency and dissolved oxygen concentration. The results from this work suggest that MEN application to domestic wastewater represents a promising approach to reduce fecal contamination of freshwater and emphasize the need to change the manufacturing habits and management of septic tanks.

Keywords: wastewater, treatment, septic tanks, fecal coliforms.

RESUMO

A contaminação fecal é um dos principais problemas de qualidade da água doce em todo o mundo. Uma das soluções propostas para este problema é o tratamento dos efluentes em nível doméstico ou local com consórcios microbianos como microrganismos efetivos nativos (MEN em espanhol). Neste trabalho avaliamos a capacidade de uma formulação MEN produzida no Uruguai para reduzir a contaminação fecal em efluentes domésticos. Para isso, foram realizados experimentos em diferentes escalas, desde *in vitro* até fossas sépticas domésticas e em um trecho do arroio Malvín (*in situ*), combinando formulação líquida com sólida de MEN e utilizando coliformes fecais (CF) e matéria orgânica particulada como indicadores de desempenho. Tanto a nível laboratorial como nas fossas sépticas, a FC diminuiu significativamente após 8 semanas de aplicação. No arroio Malvín, observou-se diminuição da FC e recuperação visual do curso d'água, com aumento da transparência e concentração de oxigênio dissolvido. Os resultados deste trabalho mostram que a aplicação de MEN em águas residuais domésticas representa uma abordagem promissora para reduzir a contaminação fecal da água doce e enfatiza a necessidade de mudar os hábitos de fabricação e gestão de fossas sépticas.

Palavras-chave: águas residuais, tratamento, fossas sépticas, coliformes fecais.

INTRODUCCIÓN

Microorganismos efectivos: el biopreparado

La tecnología de microorganismos efectivos, más conocida por su sigla en inglés EM (effective microorganisms), se basa en el uso de un consorcio de microorganismos de origen natural. Las propiedades metabólicas de los EM les confieren la capacidad de ser usados en una variedad de aplicaciones consideradas beneficiosas para la producción agrícola y la salud humana y animal, entre otras. Esta tecnología fue desarrollada originalmente en Japón, en la Universidad de Ryukyus (Higa, 1996; Talaat, et al., 2015), y hoy en día se utiliza en distintos lugares del mundo.

Los microorganismos que dominan el consorcio de microorganismos efectivos pertenecen a cinco grupos: 1) bacterias ácidolácticas (BAL, principalmente especies del género *Lactobacillus*) que promueven la fermentación y descomposición de la materia orgánica y simultáneamente producen ácido láctico, limitando la presencia de patógenos (por ejemplo patógenos de plantas, en el caso de su aplicación en suelo); 2) bacterias fototróficas del género *Rhodospseudomonas*, capaces de realizar fotosíntesis anoxigénica para obtener energía y sintetizar aminoácidos y compuestos antioxidantes a partir de materia orgánica vegetal. Los metabolitos producidos por estas bacterias promueven a su vez la presencia de levaduras y bacterias acidolácticas, favoreciendo la permanencia de los demás miembros del consorcio; 3) levaduras del género *Saccharomyces*, cuya producción de enzimas, hormonas y metabolitos es utilizada como sustrato por el resto de los microorganismos del preparado, así como otros microorganismos benéficos que puedan estar presentes en el medio donde se aplicó el preparado; 4) hongos filamentosos pertenecientes a diferentes géneros (por ejemplo *Penicillium* y *Aspergillus* spp.) que descomponen la materia orgánica rápidamente y producen compuestos que inhiben la proliferación de patógenos (por ejemplo antibióticos); 5) actinobacterias con una vasta capacidad metabólica para descomponer diversas sustancias orgánicas, además de producir compuestos antimicrobianos que suprimen microorganismos perjudiciales (Higa y Parr, 1994; Margulis, et al., 2014; Miao y Davies, 2010).

Estos preparados han sido empleados en todo el mundo para solucionar múltiples problemas en la agricultura, como inoculantes de suelos y enmiendas orgánicas; en la ganadería, cumpliendo funciones de probiótico para eliminar enfermedades del tracto digestivo y en criaderos de cerdos y avícolas, eliminando moscas y malos olores; y en el medio ambiente, como tratamiento de aguas contaminadas y acelerador de la descomposición en los vertederos de residuos sólidos urbanos (Ab Muttalib, et al., 2016; Higa y Parr, 1994; Kyan, et al., 1999; Sharma, et al., 2017). La combinación de estos grupos de microorganismos constituye el consorcio efectivo. Cabe destacar que cada grupo (o especie dentro de un grupo) por separado no tiene el mismo efecto sobre la degradación de la materia orgánica, siendo necesaria la interacción de los distintos miembros del consorcio (Margulis, et al., 2014).

Las mezclas de microorganismos efectivos son muy eficientes para acelerar significativamente la degradación de materiales vegetales de manera aerobia (compostaje). Se ha demostrado además que el consorcio de microorganismos efectivos mejora los indicadores de salud del suelo a través de la degradación de la materia

orgánica y del reciclaje de nutrientes. En los últimos años se comenzaron a aplicar para el tratamiento de efluentes y aguas residuales, así como en la recuperación de lagos. En este sentido, se ha reportado que su aplicación en lagos eutrofizados genera una reducción de la concentración de clorofila a (indicador de eutrofización) del 90.5 % (Zakaria, et al., 2010). Se hipotetiza que el preparado afecta la dinámica ya que disminuye la disponibilidad de los nutrientes, especialmente de nitrógeno (N) y fósforo (P), limitando así el crecimiento del fitoplancton. Se encontraron resultados similares luego de la aplicación de EM en el embalse de Muchawka (Polonia), con características eutróficas. Allí se halló una disminución de la concentración de N y P, y la desaparición de floraciones de cianobacterias (Sitarek, et al., 2017).

Por otro lado, Lurling y otros (2010) realizaron experimentos con agua de lago empleando EM combinado con bolas de barro (*EM-mudball*) pero no encontraron una disminución de la clorofila ni de la abundancia de cianobacterias. Estos autores proponen que la ausencia de eficacia se debe a que los EM no remueven el fósforo de los sistemas eutróficos ni tienen efecto inhibitorio directo sobre las cianobacterias. En este sentido, la forma en que se emplea el EM puede llegar a ser un determinante de su acción.

Uso de microorganismos efectivos en aguas residuales

La expansión de la agricultura industrial con un uso ineficiente de insumos (por ejemplo fertilizantes) y la ausencia de manejo de nutrientes provenientes de diversas actividades de origen antrópico han generado un aumento significativo del nivel trófico de los ecosistemas acuáticos (Khan y Ansari, 2005; Li, et al., 2022; Yu, et al., 2020). En Uruguay, la intensificación de la eutrofización fue detectada décadas atrás (Alonso, et al., 2019a, 2019b). En la actualidad, la eutrofización ocasiona graves problemas de deterioro en los ecosistemas acuáticos, donde el exceso de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno provenientes de la agricultura, la ganadería y los efluentes de las ciudades propician la generación de floraciones de cianobacterias tóxicas, lo cual constituye un serio problema de salud ambiental y humana que no está siendo abordado (Bonilla, et al., 2015; Chalar, 2006; Goyenola, et al., 2021; Huisman, et al., 2018; Kruk, et al., 2020). En este contexto, se ha reportado el empleo de EM para la remediación de aguas residuales y ha demostrado ser efectivo en la remoción de sólidos en suspensión, disminuyendo la demanda biológica (DBO) y química de oxígeno (DQO) (Okuda y Higa, 1999) (Park, et al., 2016). Sin embargo, son pocos los estudios existentes sobre este tema y la información se encuentra dispersa y poco sistematizada.

Microorganismos efectivos nativos (MEN)

El proyecto MEN Entrebichitos surgió en el año 2015, a partir de una actividad pedagógica de la Escuela N° 319 República de China, localizada en el barrio Borro, cuenca de la cañada Casavalle, en la zona periurbana de Montevideo. El proyecto trata sobre la generación de conocimiento acerca de la formulación, las propiedades y los modos de aplicación de la tecnología MEN. A partir de agosto de 2015 se comenzó a producir el biopreparado mediante la activación de un inóculo comercial. En 2016 se decidió capturar a los microorganismos que componen esta preparación con el fin de emplearlos como

inóculo y reproducirlos en las mismas condiciones que a los comerciales, logrando así independizarse de la empresa que distribuye y vende el producto. Para ello se buscaron diversas formas de captura y producción, a pequeña y gran escala, pudiendo sistematizar aquellas que demostraron ser más efectivas en diversas aplicaciones (Mesa, 2020). Posteriormente se recurrió a los vínculos existentes con el Programa Huertas en Centros Educativos de la Facultad Agronomía y con el Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable (IIBCE). Junto a la comunidad se conformó un grupo de trabajo que actualmente es una cooperativa formal que lleva el mismo nombre con el que nació el proyecto: Cooperativa de Trabajo Entrebichitos.

Desde ese momento y gracias a la interacción entre distintas personas e instituciones, se comenzó a producir el biopreparado e investigar acerca de su formulación, propiedades y modos de aplicación, generándose el producto "Entrebichitos", producido por la cooperativa antes mencionada. Dicho producto ha sido extensivamente caracterizado (Ruíz, et al., 2019; Trasante, et al., 2019) y ensayado para su uso en la transición hacia la agricultura orgánica.

En el presente trabajo se evaluó la eficacia del biopreparado MEN de Entrebichitos para el tratamiento de efluentes domésticos (aguas servidas), principalmente a través de su capacidad para degradar y remineralizar materia orgánica de origen fecal. Se realizaron experimentos a distintas escalas, desde el laboratorio a pozos sépticos ("pozos negros"), incluyendo un arroyo urbano que recibe la descarga difusa de aguas servidas. La estrategia involucró la combinación de preparado líquido con sólido, y empleando a los coliformes fecales y la materia orgánica particulada como indicadores del rendimiento de los MEN para disminuir la contaminación fecal. Nuestra hipótesis de trabajo es que la capacidad del consorcio MEN para degradar la materia orgánica provoca una disminución de su disponibilidad, limitando e impidiendo el crecimiento de organismos heterótrofos potencialmente dañinos tales como los patógenos (*E. coli* y *Salmonella* spp., entre otros), y mejorando la calidad sanitaria de los efluentes tratados respecto de aquellos que no lo son.

MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación de los MEN

La Cooperativa Entrebichitos elabora microorganismos efectivos nativos (MEN) a partir de la captura de microorganismos nativos que se encuentran en el suelo. A partir de ese material se elabora la masa madre con materiales y bajo condiciones que harán que se multipliquen los microorganismos deseados. Posteriormente la masa madre se activa con agua, alimento energético y condiciones óptimas para lograr el producto final con la composición microbiana esperada.

Caracterización de los MEN

Para asegurar que la composición de microorganismos cultivables en el preparado MEN se mantenga estable en distintos lotes se envían de rutina al Laboratorio Ecotech

(Montevideo). En la Tabla 1 se muestra un ejemplo de los valores que se obtienen del control de rutina realizado al MEN Entrebichitos.

TABLA 1. Resultado del análisis de composición y calidad del preparado líquido y sólido de MEN.

	Concentración MEN líquido	Concentración MEN sólido
Bacterias (UFC mL⁻¹)		
Heterótrofas totales	2,1 x 10 ⁷	4,8 x 10 ⁸
<i>Lactobacillus</i> spp.	9,3 x 10 ⁸	1,4 x 10 ⁶
Actinobacterias	3,4 x 10 ⁸	>3 x 10 ⁸
Hongos		
Levaduras	5,1 x 10 ⁷	5,8 x 10 ⁶
Hongos filamentosos	<1,0 x 10 ³	1,0 x 10 ³
Metales pesados (mg L⁻¹)		
Plomo	<0.005	<0.005
Arsénico	<0.005	<0.005
Mercurio	<0.005	<0.005
Cadmio	<0.001	<0.001

Evaluación de la disminución de contaminación fecal por los MEN

Se llevaron a cabo experimentos *in vitro* en el laboratorio (saneamiento de la ciudad de Montevideo) y experimentos *in situ*, tanto en pozos sépticos de viviendas como en el arroyo Malvín.

Experimento *in vitro*

Se obtuvo una muestra de 500 mL del efluente perteneciente al sistema de saneamiento de la ciudad de Montevideo (cedida por el Laboratorio de Calidad Ambiental de la Intendencia de Montevideo, en Punta Carretas). La muestra se tomó el mismo día del experimento y se trasladó al laboratorio en frío. Una vez en el laboratorio, se repartió en tubos de plástico estériles (40 mL de muestra por tubo), a los que se les agregó MEN líquido en una proporción 1:1000 (40 µL por tubo) (Federico Mesa, comunicación personal). Se realizaron tres réplicas de dicho tratamiento (saneamiento + MEN) y se dejaron tres tubos sin aplicación (saneamiento). Los tubos se incubaron en la oscuridad a 21-22 °C durante 8 días y se tomaron muestras a tiempo 0, 2, 5 y 8 días para cuantificar coliformes fecales (CF) y sólidos totales en suspensión (STS).

Experimentos *in situ*

Pozos sépticos. Se evaluaron 9 pozos negros de las viviendas del barrio Santa Catalina (Montevideo), que fueron tratados con MEN de acuerdo con el protocolo que se detalla más adelante. Se tomaron muestras de 100 mL de agua de cada pozo al inicio (T0) y luego de 8 semanas. Cada muestra fue analizada por triplicado para determinar la abundancia de CF. Por otro lado, en la Unidad 14 Piedra de los Indios del Instituto Nacional de Rehabilitación (Colonia) se evaluaron 5 pozos sépticos pertenecientes a diferentes módulos que fueron denominados como Granero, Cámara, Intramuros, Femenino y Testigo (control sin MEN) y que comprenden un total aproximado de 200 usuarios. En todos los pozos se tomaron muestras de 100 mL de agua al inicio (T0) y luego de 8 semanas. Cada muestra fue analizada por quintuplicado para determinar la abundancia de CF. Durante el transcurso del ensayo se detectó una pérdida en el pozo Intramuros, observándose que la mayor parte del contenido del pozo se perdía a través de una rotura del material de la pared. Por este motivo se decidió eliminar dicho pozo del grupo experimental.

Se realizaron aplicaciones de MEN durante 8 semanas, combinando la preparación líquida (1 L de MEN por semana) con la sólida (una pastilla de 300 cm³ de MEN sólido). En todos los casos, la primera aplicación del tratamiento (T0) consistió en 1 L de MEN más una pastilla de MEN sólido. Se repartieron cartillas a los usuarios de los pozos sépticos evaluados con información acerca del preparado e instrucciones a seguir tales como evitar el vertido de sustancias desinfectantes (hipoclorito de sodio o aromatizantes con formol) en los pozos.

Arroyo Malvín. Se utilizó como área de estudio y vertido de la solución de MEN un punto situado próximo a la Facultad de Ciencias de la Universidad de la República (34°53'3.06"S, 56° 78.57"O). Este tramo del arroyo (30 m de longitud) se encuentra a cielo abierto y cuenta con presencia muy próxima de zonas residenciales y espacios de recreación pública. El caudal se calculó en 7,4 L/s mediante el método de trazador, vertiendo una solución salina de conductividad conocida (Elosegui, 2009). En base a la profundidad promedio y al ancho del cauce, medidos en transectas cada 3 metros en el tramo de estudio, se estimó un volumen de agua aproximado de 19000 L para esa sección. Con el volumen y el caudal se calculó el tiempo de residencia del agua en el tramo $\text{Vol/Caudal} = 0,70$ h. Una vez calculados el caudal y el volumen total se vertieron 20 L de MEN líquido al arroyo (proporción 1:1000 del volumen de agua estimado para el tramo) a velocidad constante, empleando un bidón con salida controlada del líquido. Con el fin de determinar si las bacterias del preparado de MEN líquido permanecieron en la columna de agua durante los días de incubación, se determinó la abundancia de bacterias del género *Lactobacillus* dominante en el preparado MEN (Tabla 1). Para ello, se empleó la técnica de recuento en placas de agar MRS (De Man-Rogosa-Sharpe) y una atmósfera conteniendo 5 % de CO₂.

Inmediatamente después de la aplicación (T0) se tomaron 5 muestras de agua en el tramo de 30 m (cada 6 m) para determinar la abundancia de CF (American Public Health Association and American Water Works Association and Water Environment Federation, 2012) y de *Lactobacillus* spp. en la columna de agua. Se registró la conductividad, la temperatura, el oxígeno disuelto y el pH del agua con una sonda multiparamétrica portátil (Horiba U-52) y sus características organolépticas como el color y el olor. A los 3 días se tomaron muestras en los mismos sitios que a T0 y se registraron las mismas

variables. Todas las determinaciones de abundancia de CF se realizaron al menos por triplicado para cada muestra obtenida (réplicas técnicas).

Determinación de coliformes fecales y sólidos totales en suspensión

La enumeración de CF se realizó en base a la técnica de filtración en membrana, empleando diluciones seriadas de la muestra en solución salina estéril (American Public Health Association y American Water Works Association and Water Environment Federation, 2012). Todas las determinaciones de abundancia de CF se realizaron al menos por triplicado para cada muestra obtenida (réplicas técnicas).

La concentración de STS se determinó mediante la técnica de filtración, empleando membranas de fibra de vidrio y secado de acuerdo con el método de la American Public Health Association y American Water Works Association and Water Environment Federation (2012). La abundancia de CF se expresó como unidades formadoras de colonias por mL (UFC/mL) y los STS en g/mL.

Análisis de datos

Para determinar si las diferencias en la abundancia de CF observadas entre tratamientos y tiempos fueron significativas se realizaron análisis de ANOVA (con test *post-hoc* de Tukey) o Wilcoxon, dependiendo de la distribución de los datos. Para las comparaciones entre grupos se aplicó un t-test no pareado de una cola o Mann-Whitney (MW).

RESULTADOS

Eficacia *in vitro* del preparado MEN

En los experimentos realizados en el laboratorio con aguas de saneamiento de Montevideo se observó una disminución significativa de la abundancia de CF en ambos tratamientos (saneamiento solo, t-test, $p = 0,03$). Sin embargo, en el tratamiento saneamiento + MEN la abundancia disminuyó por debajo del límite de detección de la técnica empleada (t-test, $p = 0,02$) (Figura 1A). Los STS también disminuyeron en el tratamiento saneamiento + MEN, aunque dicha disminución no fue significativa (t-test, $p = 0,3$) (Figura 1B).

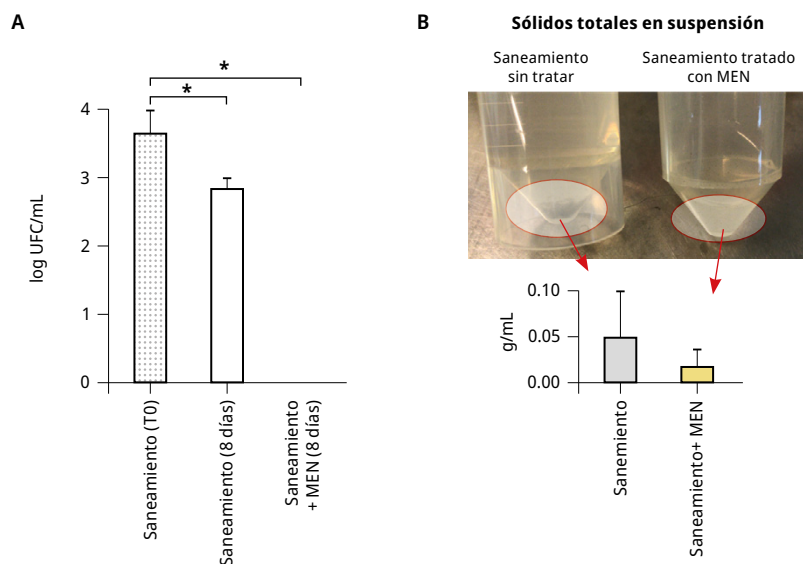


FIGURA 1. Figura 1. A) Abundancia de coliformes fecales (UFC/mL) en los tratamientos saneamiento solo y saneamiento + MEN a tiempo inicial (T0, barra sombreada, misma abundancia de UFC/mL en ambos tratamientos) y final (8 días, barras blancas). El asterisco indica diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). B) Imagen y concentración de los sólidos totales en suspensión en ambos tratamientos.

Eficacia del preparado MEN en pozos sépticos (*in situ*)

Viviendas del Barrio Santa Catalina: en la Figura 2 se muestra la abundancia de CF en los pozos tratados con MEN (líquido y sólido) al inicio (T0) y luego de 8 semanas de tratamiento. Se observó una disminución significativa de la abundancia de CF luego de 8 semanas de su aplicación (MW, $p = 0,04$).

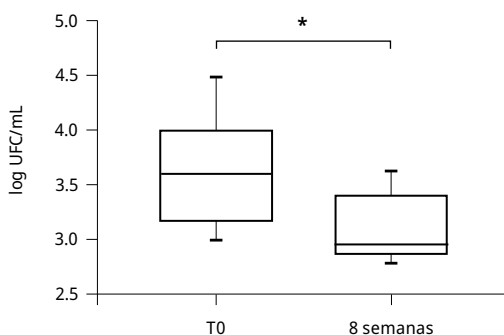


FIGURA 2. Abundancia de coliformes fecales (UFC/mL) registrada al inicio (T0) y al final (8 semanas) del tratamiento con MEN en los pozos sépticos (N = 9). El asterisco indica diferencias significativas entre ambos tiempos (MW, $p = 0,04$).

Instituto Nacional de Rehabilitación, Unidad 14 Piedra de los Indios: no se observaron diferencias significativas en la abundancia de CF entre el inicio (T0) y el final del experimento (8 semanas) para ninguno de los dos grupos (testigo y tratados con MEN). Sin embargo, se observó una disminución significativa de la abundancia de CF luego de 8 semanas en los pozos tratados con MEN en relación con el testigo (Tukey, $p = 0,01$) (Figura 3).

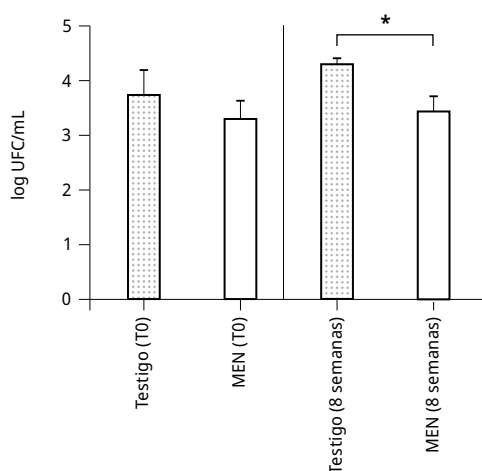


FIGURA 3. Abundancia de coliformes fecales (UFC/mL) en el pozo testigo y en los pozos sépticos tratados con MEN al inicio (T0) y al final (8 semanas) del experimento (N = 4). El asterisco indica diferencias significativas entre ambos tratamientos a las 8 semanas. Las barras sombreadas representan el pozo testigo y las blancas los pozos tratados con MEN.

Eficacia del preparado MEN en el arroyo Malvín

Se observó una disminución de un orden de magnitud en la abundancia de coliformes fecales entre el T0 y a los tres días después de la aplicación de MEN (promedio en T0: $2,1 \times 10^5$ y promedio a los 3 días: $5,0 \times 10^4$ UFC/mL), aunque no fue significativa (t-test, $p = 0,08$) (Figura 4). Se produjeron aumentos significativos de la temperatura y la concentración de oxígeno disuelto en el agua (Tukey, $p \leq 0,0001$) así como del aspecto del agua, registrándose una mayor transparencia y ausencia de olor desagradable (Figura 5). La abundancia de bacterias pertenecientes al género *Lactobacillus* disminuyó de 1×10^8 UFC/mL (concentración en el preparado de MEN líquido) a 1,40 UFC/mL.

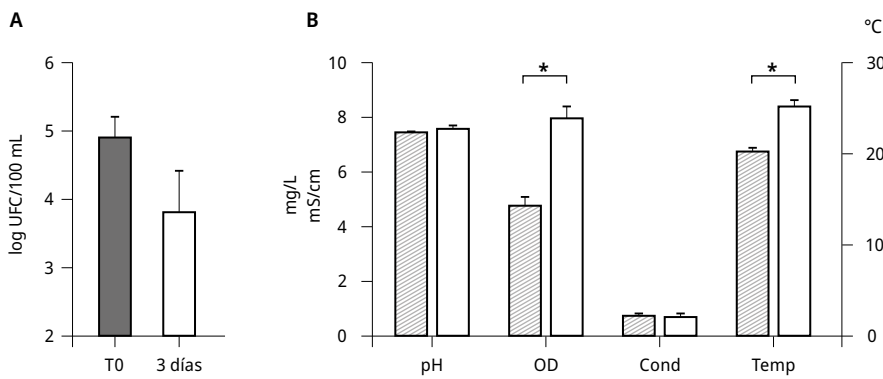


FIGURA 4. Abundancia de CF en el T0 y a los 3 días de aplicación de MEN en un punto del arroyo Malvín (A). Variación del pH, la concentración de oxígeno disuelto (OD), la conductividad (Cond) y temperatura (Temp) del agua del tramo del arroyo Malvín antes y después del tratamiento con MEN (B). Los asteriscos indican diferencias significativas entre el inicio (T0) y el final del tratamiento (3 días).



FIGURA 5. Características visuales del tramo del arroyo Malvín en el que se aplicó la solución de MEN. A) antes (T0) y 3 días después (B) de la aplicación de MEN. Se muestra el aumento de transparencia y penetración de la luz en la fotografía B), con crecimiento de algas bentónicas.

DISCUSIÓN

En Uruguay, los sistemas de saneamiento se desarrollan mediante la construcción de redes públicas y plantas de tratamiento por parte del gobierno departamental en Montevideo y del gobierno nacional en el resto del país, en este último caso a través de

la empresa estatal Obras Sanitarias del Estado (OSE) desde 1952. Este sistema alcanza al 60 % de la población del país, el restante 40 % cuenta con saneamiento individual o doméstico, que en la mayoría de los casos es ineficiente debido a su construcción (se construyen “robadores” para evitar el desborde, se perfora el piso de los pozos negros intentando infiltrar las aguas del subsuelo, etcétera), y al tratamiento y disposición final de los efluentes inadecuados. Esto genera la contaminación de las aguas a nivel local y en las microcuencas asociadas, aumentando el riesgo de enfermedades infecciosas, especialmente en comunidades de menores recursos (Uruguay, 2020). A modo de ejemplo, se han reportado ya casos de contaminación fecal de las napas superficiales, cañadas y playas en la zona costera de Uruguay, detectándose incluso la presencia de bacterias patógenas (Kruk, et al., 2019; Soumastre, et al., 2022).

Una alternativa para el tratamiento y descontaminación de efluentes domésticos es el empleo de preparados biológicos compuestos por consorcios microbianos con alta eficiencia de degradación de materia orgánica, tales como los MEN.

Si bien existen numerosos reportes del empleo de los consorcios microbianos denominados microorganismos efectivos como promotores del crecimiento y la salud de los cultivos, compostaje de restos vegetales e incluso descontaminación de suelos radiactivos (Cremeneac y Boclaci, 2018; de Araujo Ávila, et al., 2021; Domenico, 2019; Nikitin, et al., 2018; Pereira, et al., 2019; Pires, et al., 2021), la información acerca de su uso para el tratamiento de efluentes domésticos es escasa.

En este trabajo se muestran resultados sobre la actividad de los microorganismos efectivos nativos (MEN) para el tratamiento de efluentes domésticos (pozos sépticos) y en un tramo de un curso de agua contaminado (arroyo Malvín, Montevideo). Empleando los coliformes fecales como indicadores de contaminación se observó una reducción significativa de su abundancia luego de aplicar MEN según un protocolo que combina el preparado en sus versiones líquida y sólida, tanto en los pozos tratados como en el tramo del arroyo evaluado. Una hipótesis para explicar dicha disminución es la gran capacidad de degradación de materia orgánica particulada que presentan los microorganismos que forman parte del preparado, en este caso mayormente especies del género *Lentilactobacillus* (antes pertenecientes al género *Lactobacillus*), especialmente *L. buchneri* (datos no mostrados). Este grupo de microorganismos está ampliamente distribuido en la naturaleza ocupando diferentes nichos ambientales, donde juegan un papel relevante en distintos procesos de fermentación. Por ello son empleados en diversas aproximaciones biotecnológicas como la producción de bioetanol, queso, bebidas y ensilaje de forraje (Heinl y Grabherr, 2017).

Los MEN empleados en este trabajo cuentan con una alta proporción de estos organismos (>60 % de la comunidad), lo cual explicaría su gran potencial de degradación. En este sentido, es importante la reproducibilidad del preparado, es decir, el mantenimiento de la proporción de *Lentilactobacillus* y otros componentes del consorcio (Tabla 1) y su estabilidad a lo largo del tiempo, lo cual requiere controles de calidad realizados de manera regular como los aplicados en esta aproximación. Esto evita el crecimiento o enriquecimiento en grupos microbianos diferentes a los deseados y con metabolismos no efectivos para la aplicación en cuestión, generando a veces mal olor e incluso pudiendo favorecer el crecimiento de patógenos. Asimismo, la ausencia de metales pesados contaminantes también es relevante.

En el caso de la aplicación de preparados de microorganismos efectivos para aguas residuales domésticas se han reportado resultados contradictorios. Por ejemplo, Szymanski y Patterson (2003) encontraron que la aplicación de estos microorganismos en plantas de tratamiento de aguas residuales resultó en una disminución significativa de los niveles de pH, pero en un aumento de la DBO, así como niveles significativamente mayores de sólidos. Además, ensayaron la aplicación de preparados de EM en tanques sépticos y encontraron un patrón similar, sin reducción de los sólidos suspendidos en el efluente (Szymanski y Patterson, 2003). Una de las explicaciones que se han planteado para la falta de correlación entre los ensayos publicados es la dificultad de lograr un tiempo de residencia alto del preparado cuando es administrado en forma líquida, por lo que se han sugerido distintas maneras de producción del biopreparado en medios sólidos tales como bolas compuestas por suelo, barro u otros materiales que permiten aumentar el tiempo de retención de los microorganismos en el agua, logrando que su acción tenga efecto (Park, et al., 2016). En este sentido, se puede atribuir la ausencia de efecto observada en algunos de los pozos sépticos ensayados en este trabajo a la presencia de roturas, fugas o sistemas denominados “robadores” (muy comunes en Uruguay) que sirven a modo de sistema de desagüe cuando el pozo se encuentra muy lleno. Estas prácticas de perforar o construir sistemas para desagotar los pozos deberían ser evitadas antes de recurrir a la aplicación de MEN para el tratamiento de los efluentes.

Si bien en el ensayo *in vitro* la abundancia de CF en el agua de saneamiento tratada con MEN disminuyó a cero (más de tres órdenes de magnitud), se confirmó también una disminución en el tratamiento control (menos de un orden de magnitud). Esto podría ser consecuencia del sistema cerrado empleado -sin ingreso de nuevos nutrientes-, lo que eventualmente detuvo el crecimiento de todos los microorganismos, ocasionando el comienzo de la fase de muerte (Maier y Pepper, 2015). En un sistema como los pozos sépticos, donde hay una entrada de materia orgánica regular, es de esperar que las bacterias fecales no disminuyan su actividad ni crecimiento (Soumastre, et al., 2015). Esto se pudo confirmar en los ensayos de los pozos del instituto de rehabilitación, donde la carga de CF se mantuvo constante a lo largo del tiempo en ambos tratamientos, pero con una disminución significativa en los pozos tratados con MEN en relación con los no tratados. Al igual que lo reportado por Namsivayam y otros (2011), en el ensayo *in vitro* se detectó una disminución notoria en la concentración de sólidos totales en el tratamiento con MEN, que sugiere una gran actividad de degradación de materia orgánica particulada.

Una de las variables que entra en juego en este tipo de experimentos en viviendas es que no se puede descartar el empleo en los hogares de sustancias antimicrobianas que se encuentran en los productos de limpieza (hipoclorito de sodio, alcoholes, ácidos, etcétera), cuyo uso pudo haber influido en los resultados observados, disminuyendo en algunos casos la eficacia de los MEN.

Todas las observaciones realizadas dan cuenta de los diversos factores a tener en cuenta para la aplicación de MEN a nivel doméstico: estabilidad y calidad del preparado, estado del pozo séptico, tipo de biopreparado (sólido o líquido o una combinación de ambos), empleo de sustancias tóxicas para la vida y aplicación regular del consorcio microbiano. Si esto se tiene en cuenta, la aplicación de MEN surge como una práctica promisorio de saneamiento “básico o mejorado”, cuya definición según las Naciones Unidas es “la tecnología de más bajo costo que permite eliminar higiénicamente las

excretas y aguas residuales y tener un medio ambiente limpio y sano tanto en la vivienda como en las proximidades de los usuarios” (Uruguay, 2020). En este sentido, la aplicación de consorcios como el preparado MEN constituye una tecnología de saneamiento alternativo que cumple con dichos requisitos.

En el caso del tratamiento de sistemas acuáticos lóticos, donde el flujo de agua es constante, el biopreparado debería ser aplicado en forma sólida (MEN sólido por ejemplo o *mudballs* por su denominación en inglés) (Zakaria, et al., 2010). En el presente trabajo se realizó un ensayo preliminar de aplicación de MEN en el arroyo Malvín y se observó una disminución de la contaminación fecal durante 3 días. En ese lapso se produjeron cambios tanto a nivel de la transparencia del agua (detectado a nivel visual) como a nivel del aumento de productores primarios (detectado por el aumento de la concentración de oxígeno disuelto en el agua y visualmente) (Figura 4). También durante esos tres días la temperatura del agua aumentó significativamente, lo cual pudo haber contribuido al metabolismo de los MEN y al crecimiento de los productores primarios. Sin embargo, la abundancia de *Lactobacillus* en la columna de agua bajó ocho órdenes de magnitud, indicando un proceso de lavado importante y sugiriendo que habría que realizar una aplicación repetida de MEN líquido para mantener su concentración o bien emplear pastillas de MEN. Otra posible explicación de la reducción de MEN en la columna de agua es que durante los 3 días en que se observó el efecto las bacterias del MEN se encontrasen adheridas al sedimento del arroyo, lo cual no fue evaluado en este estudio. Al cabo de 3 días el arroyo volvió a su condición original (datos no mostrados), confirmando que agregar el preparado al agua no es una medida de remediación suficiente sino que debe ir acompañada de una adecuada construcción y gestión de los pozos sépticos.

REFERENCIAS

- Ab Muttalib, S. A., Ismail, S. N. S. y Praveena, S. M., 2016. Application of effective microorganism (EM) in food waste composting: A review [En línea]. En: *Asia Pacific Environmental and Occupational Health Journal*, 2(2), pp.37–47. [Consulta: 29 de julio de 2022]. Disponible en: <http://www.apeohj.org/apeohj/ojs/index.php/apeohj/index>
- Alonso, J., Quintans, F., Taks, J., Conde, D., Chalar, G., Arocena, R., Haakonsson, Aubriot, L., Goyenola, G., Muniz, P., Marrero, A., Hutton, M., Venturini, N., Pita, A. L., Iglesias, Ka., Ríos, M., Zaldúa, N., Teixeira de Mello, F., Soutullo, A., Eguren, G., Victoria, M., López-Tort, F., Maya, L., Castells, M., Benitez, M.J., Lizasoain, A., Bertoni, E., Bortagaray, V., Salvo, M., Colina, R., Azuriz, K., Castagnet, N., Evia, V., Fernández, A., Lagos, X., Marrero, L., Milans, F., Piaggio, M., Rezzano, N., López, J., Rodríguez, L., Garat, S., Pintos, M., Iriburo, A., Brena, B. y Méndez, H. 2019a. Water quality in Uruguay: current status and challenges (Section 1). En: UNESCO. *Water quality in the Americas*. México: UNESCO/IANAS. pp.561–563.
- Alonso, J., Quintans, F., Taks, J., Conde, D., Chalar, G., Arocena, R., Haakonsson, Aubriot, L., Goyenola, G., Muniz, P., Marrero, A., Hutton, M., Venturini, N., Pita, A. L., Iglesias, Ka., Ríos, M., Zaldúa, N., Teixeira de Mello, F., Soutullo, A., Eguren, G., Victoria, M., López-Tort, F., Maya, L., Castells, M., Benitez, M.J., Lizasoain, A., Bertoni, E.,

- Bortagaray, V., Salvo, M., Colina, R., Azuriz, K., Castagnet, N., Evia, V., Fernández, A., Lagos, X., Marrero, L., Milans, F., Piaggio, M., Rezzano, N., López, J., Rodríguez, L., Garat, S., Pintos, M., Iriburo, A., Brena, B. y Méndez, H. 2019b. Water quality in Uruguay: current status and challenges (Sections 5 y 6). En: UNESCO. *Water quality in the Americas*. México: UNESCO/IANAS. pp.585–597.
- American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, 2012. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 22a ed. Washington: APHA. Standard Method 4500 CL.
- 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., Gonzalez-Piana, M., Martigani, F. 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>
- Chalar, G., 2006. Dinámica de la eutrofización a diferentes escalas temporales: embalse Salto Grande (Argentina - Uruguay). En: Galizia Tundisi, José, Matsumura Tundisi, Takako y Sidagis Galli, Corina, eds. *Eutrofização na América do Sul: Causas, conseqüências e tecnologias de gerenciamento e controle*. [s.l.]: Instituto Internacional de Ecología, Instituto Internacional de Ecología e Gerenciamento Ambiental, Academia Brasileira de Ciências, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, InterAcademy Panel on International Issues, InterAmerican Network of Academies of Sciences. pp.87-101.
- Cremeneac, L. y Boclaci, T., 2018. The role of efficient microorganisms in the process of obtaining the biocompost. En: *Scientific Papers Series-Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*, 18(2), pp.135–139. ISSN 2284-7995, E-ISSN 2285-3952.
- de Araujo Ávila, G. M., Gabardo, G., Clock, D. C. y de Lima Junior, O. S., 2021. Use of efficient microorganisms in agriculture. En: *Research, Society and Development*, 10(8), e40610817515–e40610817515. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17515>
- Domenico, P., 2019. Effective microorganisms for germination and root growth in *Kalanchoe daigremontiana*. En: *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 3(3), pp.47–53. DOI: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2019.3.3.0074>
- Elosegui, A., 2009. *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Barcelona: Fundación BBVA.
- 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), e558. DOI: <https://doi.org/10.26461/22.02>
- Heinl, S. y Grabherr, R., 2017. Systems biology of robustness and flexibility: *Lactobacillus buchneri*—A show case. En: *Journal of Biotechnology*, 257, pp.61–69. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2017.01.007>
- Higa, T., 1996. *An earth saving revolution (Issue BOOK)*. Tokio: Sunmark Publishing inc.
- Higa, T. y Parr, J. F., 1994. *Beneficial and effective microorganisms for a sustainable agriculture and environment (Vol. 1)*. Atami: International Nature Farming Research Center.
- Huisman, J., Codd, G. A., Paerl, H. W., Ibelings, B. W., Verspagen, J. M. H. y Visser, P. M., 2018. Cyanobacterial blooms. En: *Nature Reviews Microbiology*, 16(8), pp.471–483. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41579-018-0040-1>
- Khan, F. A. y Ansari, A. A., 2005. Eutrophication: an ecological vision. En: *The Botanical Review*, 71(4), pp.449–482. DOI: [https://doi.org/10.1663/0006-8101\(2005\)071\[0449:EAEV\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0006-8101(2005)071[0449:EAEV]2.0.CO;2)

- Kruk, C., Dobroyan, M., Leticia González, Angel M. Segura, I. B., Natalia, Trabal, Fernanda De León, Gastón Martínez, A. R., Piccini, C. y Verrastro, N. 2019. Calidad de agua y salud ecosistémica en playas recreativas de La Paloma, Rocha. En: Asociación de Universidades Grupo Montevideo. *II Congreso de Agua, Ambiente y Energía*. Montevideo, Uruguay, (25-27 de setiembre). Montevideo: Asociación de Universidades Grupo Montevideo.
- Kruk, C., Martínez, A., de la Escalera, G. M., Trinchin, R., Manta, G., Segura, A. M., Piccini, C., Brena, B., Yannicelli, B. y Fabiano, G., 2020. Rapid freshwater discharge on the coastal ocean as a mean of long distance spreading of an unprecedented toxic cyanobacteria bloom. En: *Science of The Total Environment*, 754, 142362.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142362>
- Kyan, T., Shintani, M., Kanda, S., Sakurai, M., Ohashi, H., Fujisawa, A. y Pongdit, S., 1999. *Kyusei nature farming and the technology of effective microorganisms*. Atami: Asian Pacific Natural Agricultural Network.
- Li, Y., Fang, L., Yuanzhu, W., Mi, W., Ji, L., Guixiang, Z., Yang, P., Chen, Z. y Bi, Y., 2022. Anthropogenic activities accelerated the evolution of river trophic status. En: *Ecological Indicators*, 136, 108584. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108584>
- Lurling, M., Tolman, Y. y van Oosterhout, F., 2010. Cyanobacteria blooms cannot be controlled by Effective Microorganisms (EM®) from mud- or Bokashi-balls. En: *Hydrobiologia*, 646(1), pp.133-143. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-010-0173-3>
- Maier, R. M. y Pepper, I. L., 2015. Bacterial growth. En: Pepper, Ian L., Gerba, Charles P. y Gentry, Terry J., ed. *Environmental Microbiology*. 3ra ed. San Diego: Academic Press. pp.37-56. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394626-3.00003-X>
- Margulis, L., Bassler, B., Sandín, M., Restrepo, J., Labrador, J., Ruipérez, V., Mata, F., Santos, E., Pozuelo, P., Mier, J., Goldman, M., Lázaro, L. A. y Urederra, A. 2014. *Microbiótica*. Madrid: Ediciones Si. ISBN 978-84-941811-9-1.
- Mesa, F., 2020. Proyecto Entrebichitos, sobre microorganismos efectivos. En: Mesa, F. *Una experiencia: Entrebichitos*. Montevideo: Cooperativa MEN Entrebichitos. pp.53-57.
- Miao, V. y Davies, J., 2010. Actinobacteria: the good, the bad, and the ugly. En: *Antonie Van Leeuwenhoek*, 98(2), pp.143-150. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10482-010-9440-6>
- Namsivayam, S. K. R., Narendrakumar, G. y Kumar, J. A., 2011. Evaluation of effective microorganism (EM) for treatment of domestic sewage. En: *Journal of Experimental Sciences*, 2(7). ISSN: 2218-1768.
- Nikitin, A. N., Okumoto, S., Gutzeva, G. Z., Shintani, M., Leferd, G. A., Chesnyk, I. A. y Higa, T., 2018. Effective microorganisms as a potential tool for the remediation of 137Cs-contaminated Soils. En: Massachusetts Institute of Technology. *4th International Conference on Universal Village (UV)*. Boston, Estados Unidos, (23-24 de octubre de 2018). Boston: Massachusetts Institute of Technology.
DOI: <https://doi.org/10.1109/UV.2018.8642116>
- Okuda, A. y Higa, T., 1999. Purification of waste water with Effective Microorganisms and its utilization in agriculture. En: INFRC. *Proceedings of the 5th International Conference on Kyusei Nature Farming*. Pretoria: INFRC. pp.246-253.
- Park, G. S., Khan, A. R., Kwak, Y., Hong, S. J., Jung, B., Ullah, I., Kim, J. G., y Shin, J. H. 2016. An improved effective microorganism (EM) soil ball-making method for water quality

- restoration. En: *Environmental Science and Pollution Research*, 23(2), pp.1100–1107.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5617-x>
- Pereira, M. M. A., Morais, L. C., Marques, E. A., Martins, A. D., Cavalcanti, V. P., Rodrigues, F. A., Gonçalves, W. M., Blank, A. F., Pasqual, M. y Dória, J. 2019. Humic substances and efficient microorganisms: elicitation of medicinal plants-a review. En: *J Agric Sci*, 11(7).
DOI: <https://doi:10.5539/jas.v11n7p268>
- Pires, J. F., Viana, D. C., Braga Jr, R. A., Schwan, R. F. y Silva, C. F., 2021. Protocol to select efficient microorganisms to treat coffee wastewater. En: *Journal of Environmental Management*, 278, 111541. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111541>
- Ruiz, J., François, M., Ortíz, L., Trasante, T., Azziz, G. y Bajsa, N., 2019. Consorcios microbianos como mejoradores de suelo: conocimiento desde los agricultores. En: Facultad de Veterinaria, CIDEC y CSIC. *XII Simposio Internacional de Recursos Genéticos Para América y El Caribe*. Rocha, Uruguay, (8-11 de diciembre de 2019). Rocha: Facultad de Veterinaria, CIDEC y CSIC.
- Sharma, A., Saha, T. N., Arora, A., Shah, R. y Nain, L. 2017. Efficient microorganism compost benefits plant growth and improves soil health in Calendula and Marigold. En: *Horticultural Plant Journal*, 3(2), pp.67–72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2017.07.003>
- Sitarek, M., Napiórkowska-Krzebietke, A., Mazur, R., Czarnecki, B., Pyka, J. P., Stawecki, K., Olech, M., Sołtysiak, S. y Kapusta, A., 2017. Application of effective microorganisms technology as a lake restoration tool a case study of Muchawka reservoir. En: *J. Elem*, 22, pp.529–543. DOI: <http://dx.doi.org/10.5601/jelem.2016.21.2.1196>
- Soumastre, M., Rodríguez-Gallego, L. y Piccini, C., 2015. Enterobacterial growth in coastal groundwater wells of Cabo Polonio (Uruguay): An experimental approach. En: *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 10(3), pp.182–188.
- Soumastre, M., Piccini, J., Rodríguez-Gallego, L., González, L., Rodríguez-Graña, L., Calliari, D. y Piccini, C., 2022. Spatial and temporal dynamics and potential pathogenicity of fecal coliforms in coastal shallow groundwater wells. En: *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(2), pp.1–17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09672-0>
- Szymanski, N. y Patterson, R. A., 2003. Effective microorganisms (EM) and wastewater systems [En línea]. En: Patterson, R. A. y Jones, M. J., eds. *Proceedings of On-site '03 Conference*. Armidale: Lanfax Laboratories Armidale. pp.347-354. ISBN 0-9579438-1-4 [Consulta: 15 de agosto de 2022]. Disponible en: <http://www.lanfaxlabs.com.au/papers/P53-03-Szymanski-Patterson.PDF>
- Talaat, N. B., Ghoniem, A. E., Abdelhamid, M. T. y Shawky, B. T., 2015. Effective microorganisms improve growth performance, alter nutrients acquisition and induce compatible solutes accumulation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants subjected to salinity stress. En: *Plant Growth Regulation*, 75(1), 281–295.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10725-014-9952-6>
- Trasante, T., García, S., Lassevich, D., Senatore, D. y Bajsa, N., 2019. Caracterización del consorcio de Microorganismos Efectivos Nativos (MEN) y su uso en compostaje y cultivo de lechuga. En: Sociedad Uruguaya de Biociencias. *II Congreso Nacional de Biociencias*. Montevideo, Uruguay, (4-7 de setiembre de 2019). Montevideo: Sociedad Uruguaya de Biociencias

Uruguay. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, 2020.

Plan nacional de saneamiento. Montevideo: Uruguay.

Yu, C., Li, Z., Xu, Z. y Yang, Z., 2020. Lake recovery from eutrophication: quantitative response of trophic states to anthropogenic influences. En: *Ecological Engineering*, 143, 105697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105697>

Zakaria, Z., Gairola, S. y Shariff, N. M., 2010. Effective microorganisms (EM) technology for water quality restoration and potential for sustainable water resources and management [En línea]. En: International Environmental Modelling & Software Society. *5th International Congress on Environmental Modelling and Software*. Ottawa, Canadá, (1 de julio de 2010). Ottawa: iEMSs. [Consulta: 15 de agosto de 2022].

Disponible en: <https://scholarsarchive.byu.edu/iemssconference/2010/all/142/>

Relación entre frentes de convergencia y localización de la flota pesquera durante la ocurrencia de surgencia costera en Uruguay

Relationship between convergence fronts and location of the coastal fleet during the occurrence of coastal upwelling in Uruguay

Relação entre frentes de convergência e localização da frota costeira durante a ocorrência de ressurgência costeira no Uruguai

 CAMILA DE MELLO (1)

 MARCELO BARREIRO (1)

 YAMANDÚ MARIN (2)

 LEONARDO ORTEGA (2)

 ROMINA TRINCHIN (1)

 GASTON MANTA (1)

(1) Departamento de Ciencias de la Atmósfera y Física de los Océanos, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

(2) Dirección Nacional de Recursos Acuáticos, Montevideo, Uruguay.

RECIBIDO: 8/8/2022 → APROBADO: 1/10/2022 ✉ camidemello@gmail.com

RESUMEN

La costa uruguaya presenta eventos de surgencia durante el verano. Sus implicancias en la distribución, el transporte de nutrientes y organismos, y los efectos sobre la trama trófica no han sido previamente analizados. Este trabajo explora la relación entre los eventos de surgencia y la localización de la flota industrial costera uruguaya (Categoría B). Se realizó una aproximación lagrangiana analizando un evento particular de surgencia. A partir de campos de velocidad de corrientes superficiales se calcularon los Exponentes de Lyapunov de Tamaño Finito (ELTF). Los promedios temporales de estos exponentes, que indican la intensidad de mezcla, presentaron mayores valores sobre la región de surgencia más intensa. Los valores máximos de ELTF identifican frentes de convergencia. Así, en este trabajo se identificaron el frente de turbidez, cercano a Montevideo, y frentes de temperatura asociados a la surgencia. Durante el evento, los frentes migraron desde la costa hacia el suroeste y mar adentro. Su localización fue comparada con la posición satelital (VMS) de la flota Categoría B. En general los buques se posicionaron sobre las

zonas frontales, sugiriendo una relación entre los procesos de retención y la localización de especies objetivo que evidencia la necesidad de profundizar en el estudio de estos procesos.

Palabras clave: modelo numérico CROCO, esfuerzo de pesca, exponentes de Lyapunov.

ABSTRACT

The Uruguayan coast presents upwelling events during the summer, its implications on the distribution, transport of nutrients and organisms; and their effects on the entire food web, have not been previously analyzed. This work seeks to understand the relationship between the upwelling events and the location of the Uruguayan coastal industrial fleet (B Category). Finite Size Lyapunov Exponents (FSLE) were computed from surface current velocity fields. The temporal averages of these exponents indicate the mixing intensity and presented higher values over the region of more intense upwelling. On the other hand, the maximum FSLE values identify convergence fronts. The fronts identified by this methodology correspond to the turbidity front and close to Montevideo, and temperature fronts directly associated with the upwelling event. During the event, these fronts migrated from the coast, to the southwest and offshore. The location of the frontal regions detected was compared with the satellite position (VMS) of B Category coastal vessels of the Uruguayan fishing fleet. In general, the vessels were positioned on the frontal zones, suggesting a relationship between retention processes and the location of target species; and evidencing the need to deepen the study of these processes.

Keywords: CROCO model, fishing effort, Lyapunov exponents.

RESUMO

A costa uruguaia apresenta eventos de ressurgência durante o verão. Suas implicações na distribuição, transporte de nutrientes e organismos; e efeitos na teia alimentar não foram previamente analisados. Este trabalho busca compreender a relação entre eventos de ressurgência e a localização da frota industrial costeira uruguaia (Categoria B). Uma aproximação lagrangiana foi feita analisando um evento particular de ressurgência. Os expoentes de Lyapunov de tamanho finito (ELTF) foram calculados a partir de campos de velocidade de corrente de superfície. As médias temporais desses expoentes indicam a intensidade da mistura e apresentaram valores mais elevados ao longo da região de ressurgência mais intensa. Os valores máximos de ELTF identificam frentes de convergência. Assim, neste trabalho foram identificadas a frente de turbidez, próximo a Montevideu, e as frentes de temperatura associadas à ressurgência. Durante o evento, as frentes migraram do litoral, para o sudoeste e offshore. A sua localização foi comparada com a posição do satélite (VMS) da frota da Categoria B. Em geral, as embarcações foram posicionadas nas zonas frontais, sugerindo uma relação entre os processos de retenção e a localização das espécies alvo; e evidenciando a necessidade de aprofundar o estudo desses processos.

Palavras-chave: modelo CROCO, esforço de pesca, expoentes de Lyapunov.

INTRODUCCIÓN

La zona costera y estuarina uruguaya se caracteriza por una elevada productividad y variabilidad espaciotemporal (Guerrero y Piola, 1997; Acha, et al., 2008; Ortega y Martínez, 2007; Martínez y Ortega, 2015). La región costera, principalmente en los departamentos de Montevideo, Canelones y Maldonado, concentra la mayor parte de la población y la actividad económica del país. Montevideo cuenta con el mayor puerto de intercambio comercial marítimo de Uruguay y la zona circundante es muy activa para la pesca tanto industrial como artesanal. En este sentido, la flota artesanal (aproximadamente 190 embarcaciones < 10 Toneladas de Registro Bruto, T.R.B.) opera en una franja de 7 millas náuticas, capturando corvina (*Micropogonias furnieri*) y otras especies costeras. La flota industrial costera (33 embarcaciones > 10 TRB) opera a distancias mayores en el Río de la Plata con la misma especie objetivo que la flota artesanal y conforma una categoría denominada Categoría B (Uruguay, 1997).

Las unidades agrupadas en la Categoría B comparten la modalidad de pesca y el área de operación, además de la especie objetivo. En este sentido, el área de operación de los buques de esta categoría abarca el Río de la Plata y parte del frente oceánico. La mayor parte se realiza en profundidades < 50 m, en el Río de la Plata y el sector Atlántico de la zona económica exclusiva uruguaya. Los buques uruguayos no operan dentro de la franja de jurisdicción exclusiva de Argentina (Uruguay, 1974), y se han definido áreas de exclusión en base a criterios de ordenación pesquera que limitan la operación al oeste de Montevideo y a lo largo de la costa uruguaya en una franja de 7 y 5 millas náuticas (Uruguay, 2018). Existen estudios en Uruguay que vinculan las condiciones físicas del ambiente con la actividad pesquera artesanal (Norbis, 1995; Horta y Defeo, 2012; Jaureguizar, et al., 2015); sin embargo, no existe ninguno que relacione las condiciones físicas del ambiente con la actividad pesquera industrial.

Desde el punto de vista hidrológico, el área costera y marina uruguaya es parte de un complejo sistema que comprende la zona frontal del estuario del Río de la Plata (RdP) y el Océano Atlántico. El RdP se localiza en los 35° S y drena hacia el Océano Atlántico, tiene aproximadamente 280 km de largo y su ancho aumenta desde unos 20 km en su porción superior hasta unos 220 km en su límite exterior. Presenta una descarga media de 23.000 m³s⁻¹ y drena la segunda mayor cuenca de Sudamérica (Guerrero, et al., 1997; Nagy, et al., 2002; Guerrero, et al., 2010). La descarga del estuario presenta variabilidad a distintas escalas de tiempo. A nivel estacional presenta un mínimo durante el verano y valores máximos en general sobre otoño-invierno (Guerrero, et al., 1997; Nagy et al., 2002; Piola, et al., 2005; Guerrero, et al., 2010). Adicionalmente presenta gran variabilidad interanual, asociada particularmente con el fenómeno de El Niño-Oscilación Sur, de forma tal que episodios cálidos inducen una mayor precipitación sobre la cuenca del RdP respectivamente, determinando así mayores descargas. Episodios fríos del fenómeno inducen una menor precipitación sobre la cuenca del RdP, determinando menores descargas (Pisciottano, et al., 1994; Barreiro, 2010).

Por su parte, los patrones de viento observados en esta región presentan variabilidad estacional, siendo predominantemente del sector S-SO durante el invierno y del sector N-NE durante el verano (Simionato, et al., 2005). En la región, los vientos presentan también variabilidad diaria asociada al pasaje de sistemas sinópticos, modificando

la posición de la pluma de descarga del RdP y del frente de salinidad (generado en el encuentro de agua del RdP con aguas oceánicas). La dinámica de la zona en relación con el frente salino, junto con el aporte de nutrientes de origen continental, genera una actividad biológica relevante que se traduce en una elevada productividad primaria y zona de cría de juveniles de especies costeras (Gómez-Erache, et al., 2001; Mesones, et al., 2001; Norbis, et al., 2006).

Asociados a vientos del sector N y NE ocurren procesos de surgencia a lo largo de la costa uruguaya, cuyo mecanismo básico es el siguiente: debido a la orientación de la costa, los vientos del sector N y NE inducen un transporte de Ekman hacia mar adentro en la superficie, un transporte hacia la costa en el fondo y una surgencia a lo largo de la costa (Austin y Lentz, 2002). Estos eventos han sido reportados como frecuentes y persistentes, así como estacionalmente variables en estructura espacial, duración e intensidad, reportándose más frecuentemente durante el verano (Simionato, et al., 2010, Meccia, et al., 2013; Moira, et al., 2013; Trinchin, et al., 2019, de Mello, et al., 2022). La estructura espaciotemporal de estos eventos ha sido descrita en detalle recientemente a partir de aproximaciones satelitales y numéricas (Trinchin, et al, 2019; de Mello, et al., 2022).

Adicionalmente a los vientos y a la descarga de agua continental como factores determinantes, la batimetría del fondo también podría jugar un rol sobre el desarrollo de surgencias costeras (Pimenta, et al., 2008). Finalmente, otros posibles forzantes no son de importancia significativa a escala sinóptica y en la generación de procesos de surgencia. En particular, las mareas en la región presentan amplitudes menores a 1 m (Framiñan, et al., 1999; D'Onofrio, et al., 1999; Simionato, et al., 2004).

El estudio de los procesos de transporte y dispersión de aguas costeras relacionadas a los procesos de surgencia es de interés debido a la importancia ecológica y económica de estas regiones. En este sentido, la generación de frentes de convergencia de aguas de distintas características termohalinas relacionadas a los procesos de surgencia podría favorecer o inhibir *blooms* fitoplanctónicos, transporte de organismos y su acumulación en determinadas regiones, con consecuencias sobre toda la trama trófica (Largier, 2020); en particular, sobre las asociaciones pesqueras.

Las trayectorias que siguen las parcelas de agua han sido estudiadas mediante aproximaciones lagrangianas en varias regiones (Özgökmen, et al., 2000; Molcard, et al., 2006; Galan, et al., 2012; Berta, et al., 2014). Los descriptores Lagrangianos Exponentes de Lyapunov de Tamaño Finito (ELTF) proveen la existencia de patrones que resultan un *proxy* para el movimiento del flujo. Estos exponentes se calculan integrando las trayectorias de parcelas de agua y permiten identificar las estructuras dinámicas que organizan el transporte en un campo de velocidades (Hernández-Carrasco, et al., 2011). Los ELTF están especialmente diseñados para estudiar las propiedades de estiramiento y contracción en fluidos geofísicos y han demostrado ser adecuados para estudiar los procesos de transporte horizontal (d'Ovidio, et al., 2004). Adicionalmente, los promedios espaciales de los ELTF pueden definir una medida de la mezcla horizontal en un área determinada, de forma tal que a mayores promedios mayor es la actividad de mezcla. Además, sirven para caracterizar el transporte de estructuras en la superficie marina, así como su posición se ha correlacionado con trazadores tales como temperatura, clorofila y otras variables biológicas (d'Ovidio, et al., 2004; d'Ovidio, et al., 2009; Rossi, et al., 2008; Prants, et al., 2014; Cotté, et al., 2015). Los valores máximos de ELTF identifican las

Estructuras Coherentes Lagrangianas (ECL). Estas líneas caracterizan el flujo y modulan los movimientos del fluido actuando como barreras de transporte (Joseph y Legras, 2002; Koh y Legras, 2002), constituyendo así una herramienta poderosa para la predicción de frentes generados por advección pasiva (d'Ovidio, et al., 2004, 2009; Lehahn, et al., 2007; Rossi, et al., 2008).

A pesar de la importancia en la descripción de los procesos físicos y biológicos asociados a las surgencias costeras, este tipo de aproximaciones es aún muy incipiente. Así, este trabajo busca contribuir a comprender desde una aproximación lagrangiana la relación entre los eventos de surgencia y la localización de la pesquería industrial costera (Categoría B) en el área costera uruguaya, mediante el análisis de los campos de ELTF durante un evento particular de surgencia ocurrido en febrero de 2008.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo numérico e identificación de eventos de surgencia intensa sobre la costa uruguaya

Para el presente estudio se utilizaron salidas diarias del modelo numérico Coastal and Regional Ocean Community Model (CROCO) (Debreu, et al., 2012), que se encuentra diseñado para simular tanto los procesos mar adentro como la dinámica costera en dominios regionales (Shchepetkin y McWilliams, 2005; Debreu, et al., 2012). El CROCO es un modelo oceánico de coordenadas verticales σ (que siguen la topografía del terreno). La configuración utilizada para este análisis presentó una resolución horizontal de $1/36^\circ$ (aproximadamente 2.5 km en la región de interés) y 40 niveles σ en la vertical. Se seleccionaron los parámetros: $\sigma_s = 6$ (parámetro que determina el estiramiento en superficie de la coordenada vertical σ), $\sigma_b = 0$ (parámetro que determina el estiramiento en el fondo de la coordenada vertical σ) y $h_c = 2$ m (parámetro que representa aproximadamente la profundidad de transición entre los niveles de la superficie y los niveles del fondo). Estos parámetros resultan en una mayor resolución vertical para los niveles cercanos a la superficie.

La batimetría utilizada en las configuraciones del modelo analizadas proviene de 1 min Gridded Global Relief Data (ETOPO1) (Amante y Eakins, 2009), interpolada a la grilla del modelo y modificada para reducir los gradientes horizontales de presión. Un factor de suavizado de $r = 0.1$ ($r = \text{gradiente}(h/h)$) fue aplicado a la topografía de manera de prevenir errores de los gradientes horizontales de presión asociado con las coordenadas sigma (Haney, 1991). El dominio considerado para las simulaciones contiene el área definida por 31° S - 36° S y 50° O - 59° O, la cual incluye la costa uruguaya. Tiene fronteras abiertas en los lados Este, Oeste y Sur. Todas las condiciones oceánicas laterales fueron obtenidas del reanálisis GLORYS (Lellouche, et al., 2018), que tiene $1/12^\circ$ de resolución horizontal, para el período 2003-2012.

La descarga interanual diaria del Río de la Plata fue cedida por el Instituto Nacional del Agua de Argentina, e introducida en el modelo en 2 puntos de descarga en el RdP sobre la región de la confluencia de los ríos Paraná y Uruguay. Como forzantes de superficie del modelo se utilizaron vientos diarios provenientes del reanálisis NCEP-DOE 2 (Kanamitsu,

et al., 2002), así como flujos mensuales de calor y agua dulce (precipitación menos evaporación) derivados del Ocean Atmosphere Data Set, COADS (Da Silva, et al., 1994).

Previo a la simulación interanual se realizó una simulación climatológica de 5 años como *spin up*, de manera de alcanzar un estado estable de todas las variables, donde el modelo fue forzado con flujos medios mensuales de los forzantes superficiales y con condiciones laterales medias mensuales provenientes del World Ocean Atlas 2009 (WOA, 2009) (Levitus, et al., 2010). Las condiciones iniciales fueron obtenidas del WOA 2009 para el mes de enero. Durante la simulación de *spin up*, el modelo también fue forzado con descargas constantes del RdP con un volumen total de $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ubicadas en la misma posición que en las simulaciones interanuales. Adicionalmente, el modelo fue forzado con mareas provenientes del modelo global de mareas TPX07.

Luego de 5 años de simulación climatológica de *spin up*, una vez alcanzado un estado estable se realizó una simulación interanual desde el 1 de enero de 2003 hasta el 31 de diciembre de 2012. Esta configuración del modelo ha demostrado reproducir adecuadamente las condiciones oceanográficas medias y su variabilidad durante el verano (de Mello, et al., 2022). Para realizar el análisis se utilizaron los campos diarios de velocidad horizontal y vertical promedio e instantáneos, así como los campos de temperatura y salinidad.

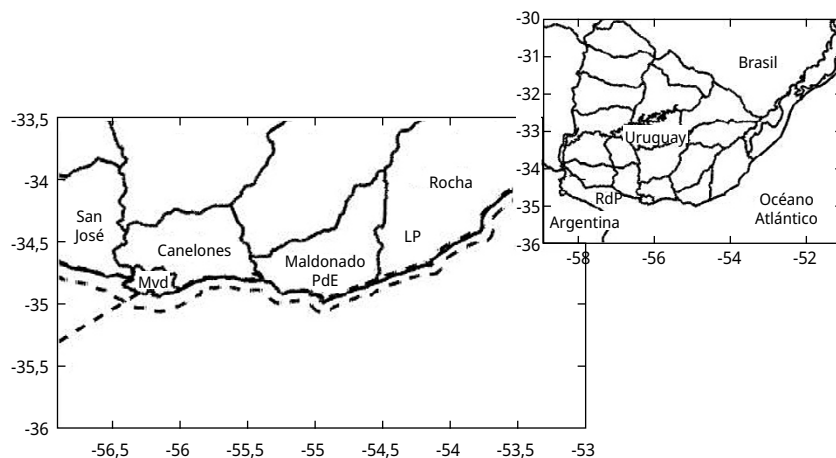


FIGURA 1. Área de estudio considerada para el cómputo de los exponentes de Lyapunovs a partir de velocidades numéricamente simuladas y su relación con la distribución de la flota pesquera. Mvd = Montevideo, PdE = Punta del Este y LP = La Paloma. Las líneas punteadas representan los límites de las áreas de veda pesquera.

Las fechas de surgencia intensa durante el verano se identificaron mediante el análisis de las Temperaturas de Superficie del Mar (TSM), simuladas siguiendo el análisis realizado por de Mello y otros (2022). En dicho trabajo se realizó un Análisis de Máxima Covarianza (Wallace, et al., 1992) entre las anomalías de TSM (aTSM) y la componente zonal de anomalías de vientos (obtenidos de NCEP-DOE Reanalysis 2, Kanamitsu, et al., 2002). Se consideraron los días de surgencia intensa a aquellas fechas en las que la serie de tiempo de las aTSM simulada fue negativa y mayor a +1 desvío estándar. Se identificaron así 15

eventos de surgencia intensa adecuadamente representados por el modelo. Se seleccionó el evento del 20 al 28 febrero de 2008 para realizar la aproximación lagrangiana y comparar los resultados con la posición disponible de la flota pesquera costera.

Aproximación lagrangiana

En este trabajo el análisis lagrangiano ha sido realizado por medio del cálculo de los ELTF (Aurell, et al., 1997). La técnica fue aplicada para cuantificar los procesos de mezcla y transporte horizontal. Esta técnica implica calcular el tiempo (τ) en que dos parcelas de fluido inicialmente separadas a una distancia δ_i alcanzan una separación final δ_f , siguiendo sus trayectorias en un campo de velocidades 2D. En la posición x y tiempo t , el ELTF se calcula como:

$$\lambda(x, t, \delta_0, \delta_f) = \frac{1}{\tau} \log \frac{\delta_f}{\delta_0}$$

Se seleccionan así los puntos iniciales x sobre los nodos de una grilla cuya separación coincide con la separación inicial de las partículas δ_0 . Así los valores λ se obtienen en una grilla con separación δ_0 . La escala del proceso de interés determina el valor de los parámetros a seleccionar (d'Ovidio, et al., 2004; Hernández-Carrasco, et al., 2011). La integración temporal de la trayectoria de las partículas puede ser realizada hacia adelante o hacia atrás en el tiempo. Cuando se realiza hacia atrás en el tiempo, los valores máximos de los ELTF indican las áreas de máxima convergencia, identificando barreras en el transporte para las trayectorias de las partículas.

En este trabajo se calcularon los ELTF diarios utilizando el campo de velocidad superficial obtenido del modelo numérico CROCO (Debreu, et al., 2012), durante el evento de surgencia intensa ocurrido del 20 al 28 de febrero de 2008. Para el cálculo solamente se consideraron las velocidades horizontales superficiales del modelo.

La aplicación del algoritmo para el cálculo de los ELTF requiere definir los parámetros que determinan las separaciones iniciales y finales entre las parcelas. La distancia inicial afecta la visibilidad de los detalles, mientras que las estructuras detectadas dependen de la separación final: si δ_f se selecciona mayor a la distancia de separación que pueden alcanzar las parcelas advectadas dentro del dominio durante el tiempo de integración seleccionado, no se van a detectar estructuras. En este estudio se trabajó con un valor de $\delta_i = 0.01^\circ$ y de $\delta_f = 0.3^\circ$, que presentan un adecuado compromiso entre las estructuras a detectar y la resolución de los datos de velocidad (de Mello, et al., 2022, en prensa).

Los exponentes se calcularon liberando un ensamble de partículas sintéticas sobre la grilla definida para el cómputo de los ELTF y siguiendo su evolución. En cada nodo de la grilla se inicializaron 5 partículas, una en el centro del nodo y las otras 4 a una distancia δ_i . Se retuvieron las parejas de más rápida divergencia (Boffetta, et al., 2001). Se realizó una integración numérica aplicando un esquema standard Runge-Kuta de cuarto orden con un tiempo de integración de 6 horas, siguiendo las parcelas durante 7 días (comparable con la duración de los eventos de surgencia intensos). Así, si τ fuera mayor a 7 días, $\lambda = 0$. La interpolación espaciotemporal de los datos de velocidad se logró mediante interpolación bilineal. Finalmente, la integración temporal fue realizada hacia atrás en el tiempo de manera de identificar las regiones de máxima compresión, es decir,

frentes de convergencia (Haller y Yuan, 2000; d'Ovidio, et al., 2004; Hernández-Carrasco, et al., 2011). Estos frentes son las regiones donde se encuentran aguas con características termohalinas contrastantes.

Posición de buques Categoría B durante operaciones pesqueras VMS

Los datos de posición de la flota pesquera dirigida a recursos costeros fueron cedidos por el Laboratorio de Tecnología Pesquera (LTP), de la Dirección Nacional de Recursos Acuáticos (DINARA). La información proporcionada para este trabajo comprende las emisiones de monitoreo satelital de VMS diarias de los buques Categoría B, sin identificar, durante las operaciones de pesca entre los días 20 y 28 de febrero de 2008. Es decir, aquellas emisiones registradas cuando los buques presentaron velocidades en el rango de 3 a 4,6 nudos, en el cual queda comprendida la mayor parte de las operaciones de pesca con red de arrastre de fondo. Esta información fue comparada con la localización de los frentes de convergencia (máximos de ELTF) detectados mediante la aproximación lagrangiana.

Información satelital

Se obtuvieron datos de TSM de un producto de imágenes satelitales provenientes de Group of High Resolution Sea Surface Temperature (MUR-GHRRST) (Chin, et al., 2017) durante las fechas de surgencia. Este producto consiste en datos satelitales diarios de 1 km de resolución horizontal. La información fue comparada con la distribución de SST del modelo numérico utilizado durante las fechas en que ocurrió la surgencia analizada.

Adicionalmente, se analizó la información de imágenes satelitales (obtenidas del satélite MODIS-AQUA) de color del agua para las fechas de la surgencia analizada de manera de inferir, a partir de imágenes, la posición de zonas frontales y compararlas cualitativamente con el resto de la información analizada.

RESULTADOS

El evento simulado por CROCO y analizado en este trabajo (20 al 28 de febrero de 2008) también fue observado por las imágenes de MUR-GHRSST. La región donde ocurrió la surgencia abarcó el área costera comprendida por las costas de Rocha hacia el Oeste, alcanzando Montevideo. En promedio, los menores valores de TSM se encontraron frente al límite de las costas de Canelones y Maldonado. Si bien el modelo simula las principales características del evento, se observaron diferencias con los datos observados principalmente hacia el Este de la Paloma, encontrándose en promedio un mayor gradiente de TSM en los datos simulados. Estas diferencias pueden deberse a diferencias en la simulación de corrientes costeras que influirían en los patrones de temperatura.

Durante el evento analizado de acuerdo con las velocidades simuladas, los mayores niveles de mezcla horizontal se observaron en las regiones costeras de Maldonado y Rocha. Se constató un patrón en el que elevados niveles de mezcla horizontal se

extendieron desde la costa oceánica hacia mar adentro. Este patrón coincidió con el patrón simulado de TSM. También fueron observados elevados niveles de mezcla horizontal sobre a la costa de Montevideo (Figura 2).

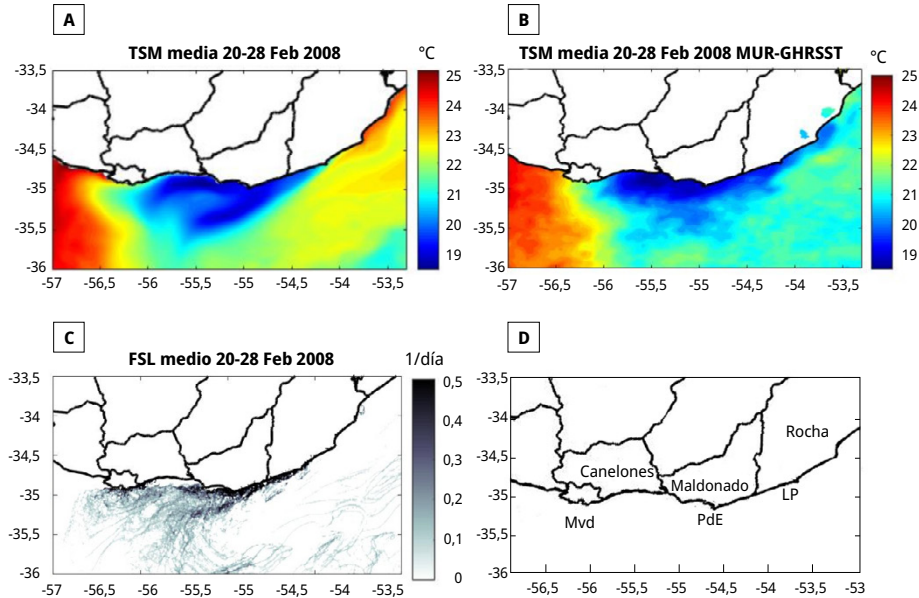


FIGURA 2. Promedio de temperatura de superficie del mar (TSM) simulada (A) y observada (B) durante el evento de surgencia analizado. C- Promedio de los Exponentes de Lyapunov de Tamaño Finito (ELTF) calculados durante el evento de surgencia analizado. D- Área de estudio: Mvd = Montevideo, PdE = Punta del Este, LP = La Paloma.

Los valores máximos de los Exponentes de Lyapunov representan los frentes de convergencia. En este análisis se encontraron 2 tipos de frentes: I) los frentes de surgencia (debidos al encuentro de aguas frías y más profundas que llegan a superficie durante la surgencia con aguas más cálidas de superficie); II) el frente halino al Oeste del área de estudio, correspondiente a la descarga del Río de la Plata y su encuentro con aguas oceánicas (que coincidió sobre la región más costera con la posición del frente de turbidez, de acuerdo con las imágenes de color del océano, Figura 3). En este sentido, cabe mencionar que durante el evento de surgencia analizado las condiciones atmosféricas presentaron una cobertura nubosa en la región de estudio que impidió ver las características de color del agua, a excepción del día 21 de febrero. De esta manera se resalta la ventaja del uso de aproximaciones lagrangianas en la detección de la posición del frente de turbidez frente a las aproximaciones satelitales que requieren la ausencia de nubosidad para su aplicación.

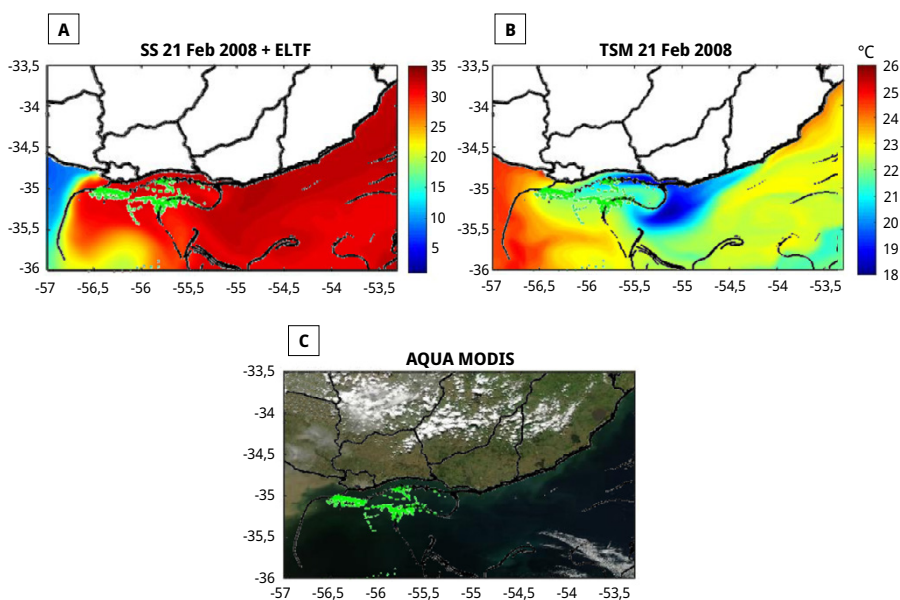


FIGURA 3. Salinidad y temperatura superficial (SS y TSM, A y B) e imagen de color True Color de Modis Aqua (C) para el día 21 de febrero de 2008. Superpuestas se encuentran las líneas de máximo de ELTF (calculados iniciando las trayectorias de las partículas hacia atrás en el tiempo el 21 de febrero) y las posiciones de buques categoría B registradas por VMS para esa fecha.

Al analizar la evolución de la surgencia se observaron frentes de convergencia que fueron cambiando su posición, desplazándose hacia el Oeste y hacia el Sur, juntándose con otros, y que eventualmente salieron del área de estudio hacia mar adentro o desaparecieron. Estos frentes representan barreras físicas al transporte de partículas. En cuanto a la ubicación de la flota pesquera, se encontró limitada hacia la costa y al Oeste por las áreas de veda (líneas grises de la Figura 4). Las emisiones de VMS tendieron a concentrarse sobre el Oeste, sobre el frente de convergencia halino donde se vieron limitadas por la zona de veda en la región más costera y sobre el Este, asociadas a los frentes de convergencias derivados de las surgencias (Figura 4).

Si bien la posición de la flota resultó concordante con la posición de los frentes de convergencia computados a partir de las velocidades simuladas, no fue exacta. En este sentido, algunas de las diferencias entre las posiciones de la flota y los frentes de convergencia podrían deberse a que las corrientes simuladas por el modelo presentan algunas diferencias con las corrientes reales existentes sobre la costa. En este sentido, ajustes en los parámetros del modelo, una mayor resolución, así como la adición de variabilidad interanual en los flujos de calor, podrían ayudar a simular de manera más precisa los procesos costeros.

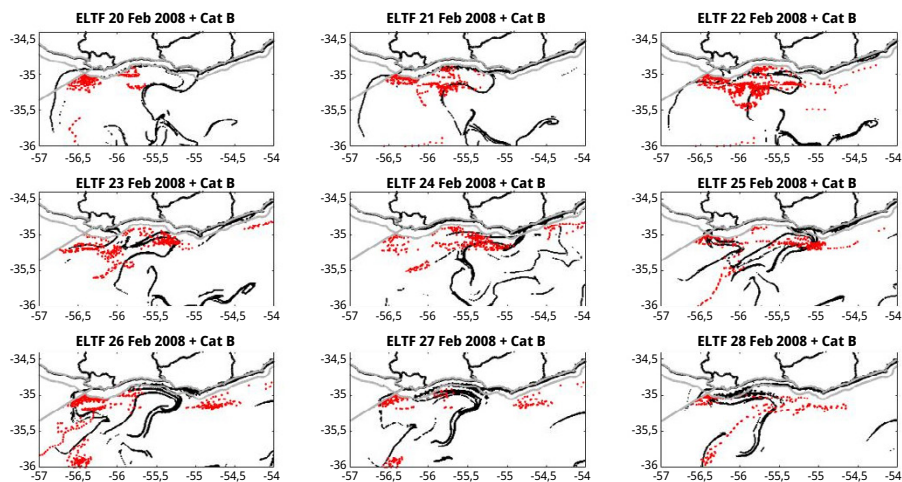


FIGURA 4. Evolución de los máximos de ELTF (líneas negras, las fechas indican el inicio de las trayectorias hacia atrás en el tiempo) durante el evento de surgencia de febrero de 2008. Se muestran las emisiones satelitales (VMS) de la flota pesquera Categoría B durante las actividades de pesca. Las líneas grises representan las zonas de veda pesquera.

DISCUSIÓN

Es reconocido que las regiones de grandes surgencias costeras son las zonas biológicamente más productivas del planeta, contribuyendo con hasta el 20 % de las capturas pesqueras (Pauly y Christensen, 1995). Los procesos explicativos del aumento de la productividad pesquera en las grandes zonas de surgencia se basan en el aumento de la productividad primaria relacionada al aporte de nutrientes de aguas frías y profundas que alcanzan la zona eufótica con la surgencia, con consecuencias en el resto de la trama trófica.

Asociadas a las grandes surgencias costeras se desarrollan frentes, áreas de retención y *eddies* que interactúan con la distribución espacial de los organismos planctónicos. Estos procesos de turbulencia modulan la estructura y biomasa de los ecosistemas ya que pueden estimular la productividad primaria, afectar la composición del plancton y de toda la trama trófica, y juegan un importante rol de intercambio entre las áreas costeras y el océano mediante el transporte de material orgánico de la costa hacia mar adentro (Oschlies y Garçon, 1998; Mackas, et al., 2005).

En nuestra costa, asociados a la predominancia de vientos con componente N, se dan procesos de surgencia climatológica durante el verano sobre la región oceánica entre Punta del Este y La Paloma (de Mello, et al., 2022). Adicionalmente, durante el verano ocurren eventos particularmente intensos de surgencias sobre la costa estuarina entre Montevideo y Punta del Este asociados a vientos anómalos desde el sector Este, lo que es más frecuente durante La Niña (Trinchin, et al., 2019; de Mello, et al., 2022). Ni el efecto de las surgencias en el aporte de nutrientes a las aguas superficiales en la productividad primaria (las cuales presentan de por sí un alto contenido de nutrientes debido al aporte del Río de la Plata), ni alguna otra implicancia ecológica de las surgencias costeras en Uruguay han sido previamente estudiadas.

En ese sentido, este trabajo representa una primera aproximación al estudio de las implicancias ecológicas de las surgencias mediante el análisis cualitativo de la relación entre los frentes derivados de las surgencias y la ubicación de los recursos pesqueros en la costa uruguaya, utilizando como *proxy* de la localización de los recursos las posiciones de la flota durante las actividades de pesca. La flota se encontró en posiciones concordantes con los frentes de convergencia, tanto con los relacionados a la surgencia como con el frente relacionado a las descargas del Río de la Plata, sugiriendo así una relación entre los procesos de retención y la posición de los recursos pesqueros.

Los frentes de convergencia retienen material en suspensión y organismos planctónicos, y tienen efectos en toda la trama trófica. Esto explicaría una mayor concentración de recursos pesqueros en sus cercanías, los cuales se estarían acercando a los frentes a alimentarse o a utilizarlos como áreas de reproducción y cría donde huevos y larvas quedarían retenidos. La relación entre los frentes de convergencia lagrangianos y la pesca ha sido previamente estudiada en otras regiones. Así, por ejemplo, las mayores capturas en el Pacífico Noroeste se encontraron principalmente a lo largo de frentes lagrangianos con condiciones favorables para la pesca (Prants, et al., 2014).

En particular, durante la surgencia analizada, el esfuerzo pesquero se concentró cercano al frente halino al Oeste de Montevideo, y cercano a los frentes térmicos derivados de la surgencia. En este sentido, en los períodos sin ocurrencias de eventos de surgencia sería esperable que los recursos y las actividades de pesca asociadas se concentren en la región cercana al frente halino del Río de la Plata. Sería importante entonces contar con información de localización de la flota durante períodos más largos, con y sin surgencia. De esta manera sería posible estudiar la importancia relativa de los frentes derivados de la surgencia y de los derivados del encuentro del RdP con aguas oceánicas sobre la concentración de los recursos pesqueros.

En general, la posición de la flota resultó concordante con la posición de los frentes de convergencia, pero no fue exacta. En este sentido, algunas de las diferencias entre las posiciones de la flota y la localización de los frentes lagrangianos identificados podrían deberse a limitantes en la operativa pesquera. Recorrer grandes trayectos y alejarse de las regiones cercanas a los puertos sin la certeza de la localización de recursos podría ser un riesgo económico no rentable.

Cabe destacar también que si bien los frentes identificados representan las regiones donde ocurre la máxima convergencia, las implicancias ecológicas de esta convergencia de agua podrían estar relacionadas a la duración de estos frentes antes de desaparecer. Tal es así que frentes lagrangianos de corta duración (que podrían ser derivados de eventos de surgencia no tan intensos) podrían tener menor impacto sobre la concentración de recursos. El material en suspensión, los nutrientes y los organismos planctónicos que se concentren allí podrían ser rápidamente dispersados al desaparecer el frente y no tener mayores consecuencias sobre la concentración de los recursos pesqueros que utilicen regiones de convergencia para alimentarse o desovar. Por lo tanto, la posición de la flota podría no encontrarse asociada a frentes de convergencia de corta duración. Esta sería una hipótesis para evaluar en futuros trabajos, reforzando así la importancia de estudiar series de tiempo mayores de la posición de la flota y su relación con los frentes de convergencia, así como la importancia de estudios ecológicos y

oceanográficos *in situ* en las regiones en las que usualmente se encuentran estos frentes durante los eventos de surgencia intensa.

Adicionalmente, las diferencias entre la localización de la flota y la localización de los frentes de convergencia también podrían deberse a que las corrientes simuladas por el modelo presentan diferencias con las corrientes reales existentes sobre la costa, por lo cual, aunque la flota se ubicara sobre los frentes a partir de nuestra aproximación detectaríamos algunas diferencias. Así, ajustes en el modelo podrían ayudar a simular de manera más realista la posición de los frentes de convergencia. De esta manera, la aproximación lagrangiana considerada en este análisis puede ser aplicada a la predicción de la localización de las zonas de convergencia, constituyendo así una herramienta para optimizar tiempos de búsqueda de áreas operativas de la flota. En este sentido, esta técnica podría ser utilizada también como un insumo por la administración pesquera.

Finalmente, considerando la cantidad y diversidad de actividades humanas adicionales a las actividades pesqueras que ocurren en la costa uruguaya y el área marina adyacente (exploración de hidrocarburos, transporte, turismo), es importante resaltar que las aproximaciones lagrangianas, en general, y la técnica de ELTF, en particular, son herramientas importantes que se deberían incorporar en estudios de evaluación de impacto ambiental, de planificación ambiental y de diseño de áreas marinas protegidas; de manera de lograr una adecuada gestión ambiental del territorio marino del Uruguay.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección Nacional de Recursos Acuáticos por la información satelital brindada. Camila de Mello agradece al programa de doctorado Pedeciba Geociencias y a la Comisión Académica de Posgrado.

REFERENCIAS

- Acha, E.M., Mianzan, H., Guerrero, R., Carreto, J., Giberto, D., Montoya, N. y Carignan, M., 2008. An overview of physical and ecological processes in the Rio de la Plata Estuary. En: *Continental Shelf Research*, 28(13), pp.1579-1588.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.01.031>
- Amante, C. y Eakins, B., 2009. *ETOPO1 1 arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis* [En línea]. Colorado: NOAA. (NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24). [Consulta: 22 de octubre de 2022].
Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Christopher-Amante/publication/228077300_ETOPO1_1_Arc-Minute_Global_Relief_Model_procedures_data_sources_and_analysis/links/59f77930458515547c24c805/ETOPO1-1-Arc-Minute-Global-Relief-Model-procedures-data-sources-and-analysis.pdf
- Aurell, E., Boffetta, G., Crisanti, A., Paladin, G. y Vulpiani, A., 1997. Predictability in the large: an extension of the concept of Lyapunov exponent. En: *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 30(1). DOI: <https://doi.org/10.1088/0305-4470/30/1/003>

- Austin, J.A. y Lentz, S.J., 2002. The inner shelf response to wind-driven upwelling and downwelling. En: *Journal of Physical Oceanography*, 32(7), pp.2171-2193.
DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)032%3C2171:TISRTW%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032%3C2171:TISRTW%3E2.0.CO;2)
- Barreiro, M., 2010. Influence of ENSO and the South Atlantic Ocean on climate predictability over Southeastern South America. En: *Climate Dynamics*, 35(7-8), pp.1493-1508. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0666-9>
- Berta, M., Ursella, L., Nencioli, F., Doglioli, A.M., Petrenko, A.A. y Cosoli, S., 2014. Surface transport in the Northeastern Adriatic Sea from FSLE analysis of HF radar measurements. En: *Continental Shelf Research*, 77(1), pp.14-23.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.01.016>
- Boffetta, G., Lacorata, G., Redaelli, G. y Vulpiani, A., 2001. Detecting barriers to transport: a review of different techniques. En: *Physica D*, 158, pp.58-70.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-2789\(01\)00330-X](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(01)00330-X)
- Chin, T.M., Vazquez-Cuervo, J. y Armstrong, E.M., 2017. A multi-scale high-resolution analysis of global sea surface temperature. En: *Remote Sensing of Environment*, 200, pp.154-169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.029>
- Cotté, C., d'Ovidio, F., Dragon, A.C., Guinet, C. y Lévy, M., 2015. Flexible preference of southern elephant seals for distinct mesoscale features within the Antarctic Circumpolar Current. En: *Progress in Ocean*, 131, pp.46-58.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.11.011>
- Da Silva, A.M., Young, C.C. y Levitus, S., 1994. *Atlas of surface marine data*. s.l.: NOAA [Consulta: 05 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.croco-ocean.org/download/datasets/>
- Debreu, L., Marchesiello, P., Penven, P. y Cambon, G., 2012. Two-way nesting in split-explicit ocean models: algorithms, implementation and validation. En: *Ocean Modelling*, 49, pp.1-21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.03.003>
- de Mello, C., Barreiro, M., Ortega, L., Trinchin, R. y Manta, G., 2022. Coastal upwelling along the Uruguayan coast: Structure, variability and drivers. En: *Journal of Marine Systems*, 230, 103735. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2022.103735>
- de Mello, C., Barreiro, M., Hernández-García, E., Trinchin, R. y Manta, G., en prensa. A Lagrangian study of summer upwelling along the Uruguayan coast. En: *Continental Shelf Research*.
- D'Onofrio, E.E., Fiore, M.M. y Romero, S.I., 1999. Return periods of extreme water levels estimated for some vulnerable areas of Buenos Aires. En: *Continental Shelf Research*, 19(13), pp.1681-1693. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(98\)00115-0](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(98)00115-0)
- d'Ovidio, F., Fernández, V., Hernández-García, E. y López, C., 2004. Mixing structures in the Mediterranean Sea from finite size Lyapunov exponents. En: *Geophysical Research Letters*, 31(17), L17203. DOI: <https://doi.org/10.1029/2004GL020328>
- d'Ovidio, F., Isern-Fontanet, J., López, C., Hernández-García, E. y García-Ladona, E., 2009. Comparison between Eulerian diagnostics and finite-size Lyapunov exponents computed from altimetry in the Algerian basin. En: *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56(1), pp.15-31.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2008.07.014>
- Framiñan, M.B., Etala, M. Acha, R., Guerrero, R., Lasta, C. y Brown, O., 1999. Physical characteristics and processes of the Río de la Plata Estuary. En: Perillo, G., Piccolo, M.

- y Quivira, M., ed. *Estuaries of South America: their morphology and dynamics*. Berlin: Springer. pp.161–194. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-60131-6_8
- Galan, A., Orfila, A., Simarro, G., Hernández-Carrasco, I. y López, C., 2012. Wave mixing rise inferred from Lyapunov exponents. En: *Environmental Fluid Mechanics*, 12(3), pp.291-300. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10652-012-9238-3>
- Gómez-Erache, M., Vizziano, D., Nuñez, Nagy, G. y Lagomarsino, J., 2001. Producción fitoplanctónica en la zona frontal del Río de la Plata. En: Vizziano, D., Puig, P., Mesones, C., Nagy, G.J., ed. *Río de la Plata: investigación para la gestión del ambiente, los recursos pesqueros y la pesquería en el frente salino*. Montevideo: Programa Ecoplata.
- Guerrero, R.A. y Piola, A.R., 1997. Masas de agua en la plataforma continental. En: Boschi, E.E., ed. *El mar Argentino y sus recursos pesqueros. Tomo 1. Antecedentes históricos de las exploraciones en el mar y las características ambientales* [En línea]. Mar del Plata: INIDEP. pp.107-118. [Consulta: 5 de agosto de 2022]. Disponible en: https://www.inidep.edu.ar/wordpress/?page_id=846
- Guerrero, R.A., Acha, E.M., Framin, M.B. y Lasta, C.A., 1997. Physical oceanography of the Río de la Plata Estuary, Argentina. En: *Continental Shelf Research*, 17(7), pp.727–742. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(96\)00061-1](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(96)00061-1)
- Guerrero, R.A., Piola, A.R., Molinari, G.N., Osiroff A.P. y Jáuregui, S.I., 2010. *Climatología de temperatura y salinidad en el Río de la Plata y su frente marítimo Argentina-Uruguay*. Mar del Plata: Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP). 95 p. ISBN 978-987-1443-03-1
- Haller, G. y Yuan, G., 2000. Lagrangian coherent structures and mixing in two-dimensional turbulence. En: *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 147(3-4), pp.352-370. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-2789\(00\)00142-1](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(00)00142-1)
- Haney, R.L., 1991. On the pressure gradient force over steep topography in sigma coordinate ocean models [En línea]. En: *Journal of physical Oceanography*, 21(4), pp.610-619. [Consulta: 22 de octubre de 2022]. Disponible en: <https://calhoun.nps.edu/handle/10945/46807>
- Hernández-Carrasco, I., López, C., Hernández-García, E. y Turiel, A., 2011. How reliable are finite-size Lyapunov exponents for the assessment of ocean dynamics? En: *Ocean Modelling*, 36(3-4), pp.208-218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.12.006>
- Horta, S. y Defeo, O., 2012. The spatial dynamics of the whitemouth croaker artisanal fishery in Uruguay and interdependencies with the industrial fleet. En: *Fisheries Research*, 125–126, pp.121-128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2012.02.007>
- Jaureguizar, A., Cortés, F., Milessi, A., Cozzolino, E. y Allegra, L., 2015. A trans-ecosystem fishery: Environmental effects on the small-scale gillnet fishery along the Río de la Plata boundary. En: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 166, Part A, pp.92-104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.11.003>
- Joseph, B. y Legras, B., 2002. Relation between kinematic boundaries, stirring, and barriers for the Antarctic polar vortex. En: *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59(7), pp.1198-1212. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2002\)059%3C1198:RBKBSA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059%3C1198:RBKBSA%3E2.0.CO;2)
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S.K., Hnilo, J.J., Fiorino, M. y Potter, G.L., 2002. En: *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(11), pp.1631-1643. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-83-11-1631>

- Koh, T.Y. y Legras, B., 2002. Hyperbolic lines and the stratospheric polar vortex. En: *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 12(2), pp.382-394. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1480442>
- Largier, J.L., 2020. Upwelling bays: how coastal upwelling controls circulation, habitat, and productivity in bays. En: *Annual Review of Marine Science*, 12, pp.415-447. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010419-011020>
- Lehahn, Y., d'Ovidio, F., Lévy, M. y Heifetz, E., 2007. Stirring of the northeast Atlantic spring bloom: A Lagrangian analysis based on multisatellite data. En: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C8). DOI: <https://doi.org/10.1029/2006JC003927>
- Lellouche, J.M., Le Galloudec, O., Greiner, E., Garric, G., Regnier, C., Drevillon, M. y Le Traon, P. Y., 2018. The Copernicus Marine Environment Monitoring Service global ocean 1/12° physical reanalysis GLORYS12V1: description and quality assessment [En línea]. En: EGU. *20th EGU General Assembly, EGU2018. Proceedings from the conference held 4-13 April, 2018 in Vienna, Austria*. p.19806. [Consulta: 22 de octubre de 2022]. Disponible en: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018EGUGA..2019806L/abstract>
- Levitus, S., Locarnini, R.A., Boyer, T.P., Mishonov, A.V., Antonov, J.I., Garcia, H.E., Baranova, O., Zweng, M., Johnson, D. y Seidov, D., 2010. *World ocean atlas 2009, WOA2009* [En línea]. Washington: NOAA. [Consulta: 05 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.croco-ocean.org/download/datasets/>
- Mackas, D.L., Tsurumi, M., Galbraith, M.D. y Yelland, D.R., 2005. Zooplankton distribution and dynamics in a North Pacific Eddy of coastal origin: II. Mechanisms of eddy colonization by and retention of offshore species. En: *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 52(7-8), pp.1011-1035. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2005.02.008>
- Martínez, A. y Ortega, L., 2015. Delimitation of domains in the external Río de la Plata estuary, involving phytoplanktonic and hydrographic variables. En: *Brazilian Journal of Oceanography*, 63(3), pp.217-227. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1679-87592015086106303>
- Meccia, V.L., Simionato, C.G. y Guerrero, R.A., 2013. The Rio de la Plata Estuary response to wind variability in synoptic timescale: salinity fields and salt wedge structure. En: *Journal of Coastal Research*, 29(1), pp.61-77. DOI: <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00063.1>
- Mesones, C., Puig, P. y Martínez, A., 2001. Relación de especies costeras con las características ambientales. En: Vizziano, D., Puig, P., Mesones, C. y Nagy, G.J., ed. *Río de la Plata: investigación para la gestión del ambiente, los recursos pesqueros y la pesquería en el frente salino*. Montevideo: Programa EcoPlata.
- Moira, L.C., Simionato, C., Campetella, C., Moreira, D. y Guerrero, R., 2013. Surgencia, ¿Un fenómeno común en la costa norte del Río de la Plata exterior? En: *Frente Marítimo*, 23, pp.275-290.
- Molcard, A., Poje, A.C. y Özgökmen, T.M., 2006. Directed drifter launch strategies for Lagrangian data assimilation using hyperbolic trajectories. En: *Ocean Modelling*, 12(3-4), pp.268-289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2005.06.004>
- Nagy, G.J., Gómez-Erache, M., López, C.H. y Perdomo, A.C., 2002. Distribution patterns of nutrients and symptoms of eutrophication in the Río de la Plata River Estuary System. En: *Hydrobiologia*, 475/476, pp.125-139. DOI: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1020300906000>

- Norbis, W., 1995. Influence of wind, behaviour and characteristics of the croaker (*Micropogonias furnieri*) artisanal fishery in the Rio de la Plata (Uruguay).
En: *Fisheries Research*, 22(1-2), pp.43-58. ISSN 0165-7836.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0165-7836\(94\)00310-5](https://doi.org/10.1016/0165-7836(94)00310-5)
- Norbis, W., Paesch, L. y Galli, O., 2006. Los recursos pesqueros de la costa de Uruguay: ambiente, biología y gestión. En: Menafra, 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. 668 p.
- Ortega, L. y Martínez, A., 2007. Multiannual and seasonal variability of water masses and fronts over the Uruguayan shelf. En: *Journal of Coastal Research*, 23(3), pp.618-629.
DOI: <https://doi.org/10.2112/04-0221.1>
- Oschlies, A. y Garçon, V., 1998. Eddy-induced enhancement of primary production in a model of the North Atlantic Ocean. En: *Nature*, 394(6690), pp.266-269.
DOI: <https://doi.org/10.1038/28373>
- Özgökmen, T.M., Griffa, A., Mariano, A.J. y Piterbarg, L.I., 2000. On the predictability of Lagrangian trajectories in the ocean [En línea]. En: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17(3), pp.366-383. [Consulta: 10 de agosto de 2022].
Disponible en: <http://www.tamayozgokmen.org/ftp-pub/jmr04.pdf>
- Pauly, D. y Christensen, V., 1995. Primary production required to sustain global fisheries. En: *Nature*, 374(6519), pp.255-257. DOI: <https://doi.org/10.1038/374255a0>
- Pimenta, F., Garvine, R. W. y Münchow, A., 2008. Observations of coastal upwelling off Uruguay downshelf of the Plata estuary, South America. En: *Journal of Marine Research*, 66(6), pp.835-872.
- Piola, A.R., Matano, R.P., Palma, E.D., Möller Jr, O.O. y Campos, E.J., 2005. The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf. En: *Geophysical Research Letters*, 32(1). DOI: <https://doi.org/10.1029/2004GL021638>
- Pisciottano, G., Díaz, A., Cazess, G. y Mechoso, C.R., 1994. El niño-southern oscillation impact on rainfall in Uruguay. En: *Journal of Climate*, 7(8), pp.1286-1302.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1994\)07%3C1286:ENSOIO%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1994)07%3C1286:ENSOIO%3E2.0.CO;2)
- Prants, S.V., Budyansky, M.V. y Uleysky, M.Y., 2014. Identifying Lagrangian fronts with favourable fishery conditions. En: *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 90, pp.27-35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.04.012>
- Rossi, V., López, C., Sudre, J., Hernández-García, E. y Garçon, V., 2008. Comparative study of mixing and biological activity of the Benguela and Canary upwelling systems. En: *Geophysical Research Letters*, 35(11). DOI: <https://doi.org/10.1029/2008GL033610>
- Shchepetkin, A.F. y McWilliams, J.C., 1998. Quasi-monotone advection schemes based on explicit locally adaptive dissipation. En: *Monthly Weather Review*, 126(6), pp.1541-1580.
DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<1541:QMASBO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<1541:QMASBO>2.0.CO;2)
- Simionato, C.G., Dragani, W., Meccia, V. y Nuñez, M., 2004. A numerical study of the barotropic circulation of the Río de la Plata estuary: sensitivity to bathymetry, the Earth's rotation and low frequency wind variability. En: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 61(2), pp.261-273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2004.05.005>
- Simionato, C.G., Vera, C.S. y Siegmund, F., 2005. Surface wind variability on seasonal and interannual scales over Río de la Plata area. En: *Journal of Coastal Research*, 21(4), pp.770-783. DOI: <http://dx.doi.org/10.2112/008-NIS.1>

- Simionato, C.G., Tejedor, M.L.C., Campetella, C., Guerrero, R. y Moreira, D., 2010. Patterns of sea surface temperature variability on seasonal to sub-annual scales at and offshore the Río de la Plata estuary. En: *Continental Shelf Research*, 30(19), pp.1983-1997. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.09.012>
- Trinchin, R., Ortega, L. y Barreiro, M., 2019. Spatiotemporal characterization of summer coastal upwelling events in Uruguay, South America. En: *Regional Studies in Marine Science*, 31, 100787. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100787>
- Uruguay. Decreto Ley 14145, de 25 de enero de 1974. *Diario Oficial* [En línea], 07 de febrero de 1974. [Consulta: 22 de octubre de 2022]. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos-ley/14145-1974/1>
- Uruguay. Decreto 149/997, de 7 de mayo de 1997. *Diario Oficial* [En línea], 20 de mayo de 1997. [Consulta: 10 de agosto de 2022]. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/149-1997>
- Uruguay. Decreto 115/018, de 24 de abril de 2018. *Diario Oficial* [En línea], 04 de mayo de 2018. [Consulta: 10 de agosto de 2022]. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/115-2018>
- Wallace, J.M., Smith, C. y Bretherton, C.S., 1992. Singular value decomposition of wintertime sea surface temperature and 500-mb height anomalies. En: *Journal of Climate*, 5(6), pp.561-576. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1992\)005<0561:SV DOWS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1992)005<0561:SV DOWS>2.0.CO;2)

Resistividad eléctrica de la madera de *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*

Electrical resistivity of the wood of *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* and *Quercus scytophylla*

Resistividade elétrica da madeira de *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* e *Quercus scytophylla*

 JAVIER RAMÓN SOTOMAYOR CASTELLANOS (1)

 ISRAEL MACEDO ALQUICIRA (1)

 ERNESTO MENDOZA GONZÁLEZ (1)

(1) Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

RECIBIDO: 1/8/2022 → APROBADO: 14/12/2022 ✉ madera999@yahoo.com

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue determinar la resistividad eléctrica de la madera de *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla* en las direcciones de anisotropía. Para ello se prepararon 20 probetas de madera sólida de cada una de las especies con dimensiones de 20 mm × 20 mm × 20 mm en las direcciones radial, tangencial y longitudinal, respectivamente, y se determinó la densidad y el contenido de humedad de la madera. Para realizar las pruebas de resistividad eléctrica se midió la resistencia eléctrica empleando corriente continua con una tensión de prueba de 1000 voltios. El contenido de humedad fue para *P. pseudostrobus* 12,6%, para *T. rosea* 10,6% y para *Q. scytophylla* 15,6%. La resistividad eléctrica transversal promedio fue para *P. pseudostrobus* 45,5 MΩ m, para *T. rosea* 10,3 MΩ m y para *Q. scytophylla* 61,4 MΩ m. La resistividad eléctrica longitudinal fue para *P. pseudostrobus* 24,7 MΩ m, para *T. rosea* 2,2 MΩ m y para *Q. scytophylla* 19,6 MΩ m. Las magnitudes de las resistencias longitudinales medidas en las tres maderas son similares a las de las maderas reportadas en la literatura. Otro hallazgo fue que los valores de las resistividades muestran diferencias entre las direcciones de anisotropía de la madera y entre las especies estudiadas.

Palabras clave: densidad de la madera, humedad de la madera, resistencia eléctrica, corriente continua, anisotropía.

ABSTRACT

The objective of the research was to determine the electrical resistivity of the wood of *Pinus pseudostrabus*, *Tabebuia rosea* and *Quercus scytophylla* in the directions of anisotropy. For this, 20 solid wood specimens of each of the species with dimensions of 20 mm × 20 mm × 20 mm in the radial, tangential and longitudinal directions, respectively, were prepared, and the density and moisture content of the wood were determined. To carry out the electrical resistivity tests, the electrical resistance was measured using direct current with a test voltage of 1000 volts. Moisture content was for *P. pseudostrabus* 12,6%, for *T. rosea* 10,6% and for *Q. scytophylla* 15,6%. The average transverse electrical resistivity was for *P. pseudostrabus* 45,5 MΩ m, for *T. rosea* 10,3 MΩ m and for *Q. scytophylla* 61,4 MΩ m. The longitudinal electrical resistivity was for *P. pseudostrabus* 24,7 MΩ m, for *T. rosea* 2,2 MΩ m and for *Q. scytophylla* 19,6 MΩ m. The magnitudes of the longitudinal resistances measured in the three woods are similar to those of the woods reported in the literature. Another finding was that the resistivity values show differences between the anisotropy directions of the wood and between the species studied.

Keywords: wood density, wood moisture, electrical resistance, direct current, anisotropy.

RESUMO

O objetivo da pesquisa foi determinar a resistividade elétrica da madeira de *Pinus pseudostrabus*, *Tabebuia rosea* e *Quercus scytophylla* nas direções da anisotropia. Para isso, foram preparados 20 espécimes de madeira maciça de cada uma das espécies com dimensões de 20 mm × 20 mm × 20 mm nas direções radial, tangencial e longitudinal, respectivamente, e foram determinados a densidade e o teor de umidade da madeira. Para realizar os testes de resistividade elétrica, a resistência elétrica foi medida usando corrente contínua com uma tensão de teste de 1000 volts. O conteúdo de umidade foi para *P. pseudostrabus* 12,6%, para *T. rosea* 10,6% e para *Q. scytophylla* 15,6%. A resistividade elétrica transversal média foi para *P. pseudostrabus* 45,5 MΩ m, para *T. rosea* 10,3 MΩ m, e para *Q. scytophylla* 61,4 MΩ m. A resistividade elétrica longitudinal foi para *P. pseudostrabus* 24,7 MΩ m, para *T. rosea* 2,2 MΩ m, e para *Q. scytophylla* 19,6 MΩ m. As magnitudes das resistências longitudinais medidas nas três madeiras são semelhantes às das madeiras relatadas na literatura. Outra constatação foi que os valores de resistividade apresentam diferenças entre as direções de anisotropia da madeira e entre as espécies estudadas.

Palavras-chave: densidade da madeira, umidade da madeira, resistência elétrica, corrente contínua, anisotropia.

INTRODUCCIÓN

La resistividad eléctrica de la madera, también denominada resistencia eléctrica específica, es una propiedad intrínseca del material y se define como la resistencia

óhmica medida en una probeta en un área de sección transversal y a una distancia definida entre electrodos y/o posiciones de aplicación de voltaje (Hafsa, et al., 2021). De tal forma que para determinar la resistividad eléctrica de la madera es necesario medir su resistencia eléctrica.

En función de los objetivos específicos de cada investigación, la literatura sobre la resistividad eléctrica de la madera reporta valores de resistencia eléctrica medidos en diferentes especies, direcciones anisotrópicas y con diferentes protocolos experimentales. Dado que la resistencia eléctrica es una característica extensiva del material, la determinación de su magnitud y el cálculo posterior de la resistividad varían ampliamente entre investigaciones.

El contenido de humedad, la especie, la anisotropía, la temperatura y la densidad son factores inherentes a la madera que afectan la determinación de su resistividad eléctrica. En el mismo sentido, las variables experimentales que modifican la medición del flujo eléctrico en la madera son las dimensiones y la forma de las probetas, la magnitud y duración del voltaje aplicado, el tipo y la configuración de los electrodos, la presión de contacto, así como los efectos electrolíticos en la pared celular del plano leñoso (Casans, et al., 2019; Hafsa, et al., 2021; Hwang, et al., 2021).

Las investigaciones donde se aplica un voltaje a una pieza de madera están principalmente orientadas hacia el estudio de alteraciones del plano leñoso. Por ejemplo, se analiza la variación de la resistencia eléctrica en la madera para varios estados de su deterioro biológico (Gao, et al., 2019). A medida que el deterioro de una pieza de madera avanza, su estructura anatómica y su composición química se modifican y la resistencia eléctrica disminuye. Este enfoque se aplica para medir la vitalidad de árboles en pie (Losso, et al., 2020), el efecto de la temperatura en la resistividad de trozas (Luo, et al., 2019), el deterioro de la madera controlado en condiciones de laboratorio (Kirker, et al., 2016), la variación de la resistencia eléctrica en madera modificada (Van Blokland y Adamopoulos, 2022) y la evaluación del estado tecnológico de madera arqueológica (Fediuk, et al., 2020).

Otro enfoque de aplicación de las propiedades eléctricas de la madera es su estudio como un biomaterial sensible, conceptualizado como un sustrato conductor para dispositivos electrónicos, por lo que podría ser una alternativa renovable a los sustratos plásticos tradicionalmente utilizados (Guo, et al., 2018; Zhang y Shen, 2019).

La escala de observación para el estudio de las propiedades eléctricas de la madera ha sido objeto de estudio, desde la tomografía de árboles en pie (Ganthaler, et al., 2019), pasando por probetas de pequeñas dimensiones (Otten, et al., 2017), hasta el nivel de la pared celular (Zelinka, et al., 2016). Para fines prácticos, cada autor mide la resistencia eléctrica en probetas con dimensiones apropiadas de acuerdo con los objetivos de sus investigaciones.

El mecanismo de conducción eléctrica en la madera depende de la presencia de iones, como portadores de carga en la pared celular, y de las propiedades de porosidad del plano leñoso, lo que resulta en un mecanismo de percolación a través del cual se produce el movimiento de iones (Zelinka, et al., 2016; Fredriksson, et al., 2021). Así, la estructura anatómica (Jiang, et al., 2003) y su composición química (Jakes, et al., 2013) juegan igualmente un papel importante en los fenómenos de transferencia del flujo eléctrico.

Una de las aplicaciones más importantes de la caracterización de las propiedades de resistencia eléctrica de la madera es la correlación con su contenido de humedad (Fernández-Golfín, et al., 2012). El paradigma vigente en ciencias de la madera propone que con la disminución del contenido de agua presente en la madera, su resistividad aumenta y, por lo tanto, la madera seca se convierte en un material aislante (Martin y Günther, 2013; Gao, et al., 2018). Este principio físico es usado en el diseño de aparatos comerciales para estimar el contenido de humedad en una pieza de madera. De tal forma que en la literatura se proponen correlaciones entre estas dos variables (Xu, et al., 2019). No obstante, estos modelos son únicamente de aplicación práctica para las especies y condiciones experimentales en las cuales fueron determinadas.

Las mediciones de resistencia eléctrica para la determinación del contenido de humedad de la madera son utilizadas en el monitoreo no destructivo de estructuras de madera (Grönquist, et al., 2021). Igualmente, las propiedades eléctricas de la madera son útiles para la caracterización y el desarrollo de materiales compuestos (Li, et al., 2020). En el mismo sentido, la resistencia eléctrica se aplica para evaluar el comportamiento de la transferencia de humedad en el rendimiento de elementos estructurales de madera expuestos al fuego (Suzuki, et al., 2021).

A pesar de su importancia tecnológica, en la literatura mexicana no se reportan valores de la resistividad eléctrica de especies endémicas de madera. El objetivo de esta investigación fue determinar la resistividad eléctrica en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* empleando probetas de pequeñas dimensiones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se prepararon 20 probetas de madera sólida de cada una de las especies *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*. Sus dimensiones fueron 20 mm × 20 mm × 20 mm en las direcciones radial, tangencial y longitudinal, respectivamente. La madera se almacenó en una cámara de acondicionamiento a temperatura de 20 °C y humedad relativa del aire de 65%, hasta que su peso fue constante. La densidad de la madera se determinó con la relación peso/volumen de la probeta al momento del ensayo. Después de las pruebas de resistividad eléctrica, el contenido de humedad de la madera se determinó con la diferencia de pesos al momento del ensayo y en el estado anhidro.

Las pruebas de resistividad eléctrica siguieron el siguiente protocolo: cada probeta se cepilló en sus seis caras y se posicionó entre los soportes y superficies de contacto del dispositivo fabricado para la presente investigación (Figura 1).

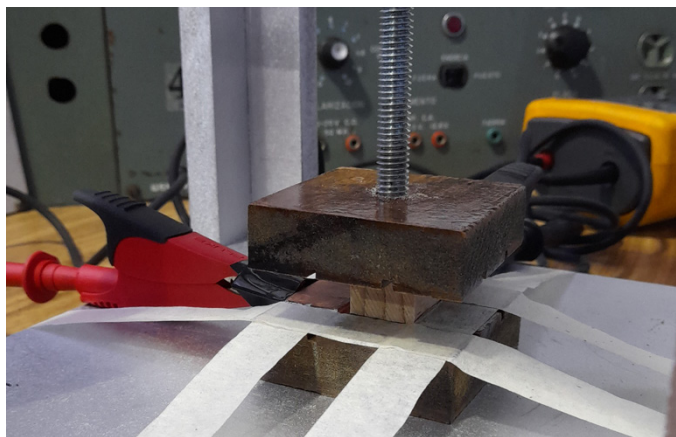


FIGURA 1. Dispositivo fabricado para las pruebas de resistividad eléctrica.

Para lograr un contacto uniforme entre la madera y las placas de cobre de 0,9 mm de espesor con resistividad eléctrica de $1,72 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$, el dispositivo aplicó presión suficiente para asegurar un flujo estable de corriente directa según la dirección y el acomodo de la probeta (Figura 2). Para cada dirección de anisotropía de la madera, se midió la resistencia eléctrica con un aparato marca Fluke, modelo 1520. En una serie de pruebas preliminares se aplicaron voltajes de 250, 500 y 1000 voltios y se observó que solo la tensión de prueba de 1000 voltios inducía mediciones de resistencia repetitivas y estables. De tal forma que se seleccionó aplicar un voltaje de 1000 voltios para las mediciones de resistencia eléctrica.

En cada prueba se realizaron tres mediciones, y con su promedio se calculó la resistividad eléctrica mediante la Ecuación 1.

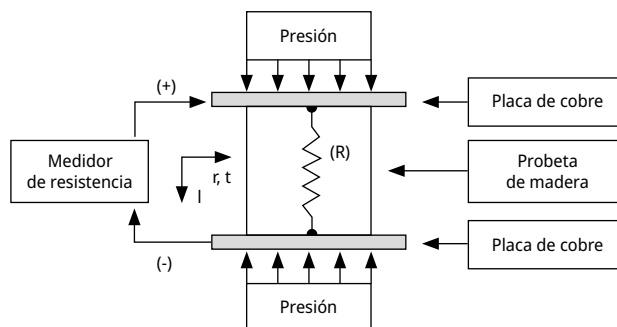


FIGURA 2. Configuración de las pruebas de resistividad eléctrica. R = Resistencia eléctrica; r = Dirección radial; t = Dirección tangencial; l = dirección longitudinal.

$$\rho = R \times \left(\frac{A}{l} \right) \quad (1)$$

Donde:

ρ = Resistividad eléctrica ($\Omega \text{ m}$)

R = Resistencia eléctrica (Ω)

A = Área transversal a la dirección del flujo eléctrico (m^2)

l = Distancia entre electrodos o puntos de aplicación del voltaje (m)

En lo subsecuente, al símbolo de la resistividad eléctrica ρ se le asocian los subíndices r, t y l para explicitar que la dirección del flujo eléctrico se midió en las direcciones radial, tangencial y longitudinal respectivamente: ρ_r , ρ_t , ρ_l .

Diseño experimental

Para cada especie (*P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*), la resistividad se calculó con la Ecuación 1 y se agruparon cuatro muestras: resistividad radial (ρ_r), resistividad tangencial (ρ_t), resistividad promedio radial-tangencial (Prom $\rho_r + \rho_t = [(\rho_r + \rho_t)/2]$) y resistividad longitudinal (ρ_l). Para cada especie, los datos se compararon en pares: ρ_r versus ρ_t y Prom $\rho_r + \rho_t$ versus ρ_l .

Se realizaron pruebas de normalidad de las distribuciones en cada una de las tres direcciones de anisotropía. El criterio de demarcación para considerar una distribución normal fue valores del sesgo estandarizado (SE) y apuntamiento estandarizado (AE) al interior del intervalo $[-2 < SE, AE < +2]$. Para estos parámetros y para la densidad (ρ_{CH}) y el contenido de humedad (CH) se determinaron su media (μ), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación ($CV = \sigma/\mu$).

Se realizaron pruebas de verificación y análisis de varianza con la hipótesis nula $H_0: \sigma_1 = \sigma_2$ donde σ es la desviación estándar y los subíndices 1 y 2 se refieren a las muestras contrastadas. El criterio de demarcación fue valores de $P_{(\alpha = 0,05)} \geq 0,05$, para considerar que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95% de confianza.

Cuando no se cumplió con este criterio de demarcación, se realizaron pruebas de diferencias de medianas (x) de Kruskal-Wallis (K-W) con la hipótesis nula: $H_0: x_1 = x_2$, donde x es la mediana y los subíndices 1 y 2 se refieren a las muestras contrastadas. Se realizaron pruebas de rangos múltiples (RM) con el criterio de demarcación de que no existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que comparten una misma columna de x .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de la densidad son comparables con los reportados por el Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas (Sotomayor, 2015): *P. pseudostrobus*, 540 kg m⁻³; *T. rosea*, 635 kg m⁻³ y *Q. scytophylla*, 637 kg m⁻³. En el mismo sentido, sus coeficientes de variación son aceptables para especies mexicanas de 10%.

El contenido de humedad de la madera varía en un intervalo de 3,9% (máximo *Q. scytophylla*, 14,4%, y mínimo *T. rosea*, 10,6%), de tal forma que se puede considerar a la madera en estado seco y con un contenido de humedad similar al alcanzado en condiciones interiores de servicio de piezas de madera. Sin embargo, los coeficientes de variación son grandes, particularmente los de *T. rosea* (CH = 10,6, CV = 28,8%). Dado que la resistencia eléctrica de la madera aumenta de manera exponencial cuando su contenido de humedad disminuye (Fernández-Golfín, et al., 2012; Xu, et al., 2019), este parámetro contribuyó en la variación de los resultados.

Resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica de la madera es una característica extensiva que depende de la cantidad de materia y/o de las dimensiones del espécimen en estudio. De tal forma que es difícil comparar directamente las magnitudes reportadas en la literatura. No obstante, las magnitudes de las resistencias longitudinales medidas en *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* son similares a las de la madera sólida de *Picea abies* reportadas por Slávik y otros (2019), quienes utilizaron un sistema de circuito simple de resistencia-condensador, adaptado para probetas de pequeñas dimensiones, con contenidos de humedad en el rango entre 10% y 15%. Sus condiciones son similares a las de la presente investigación ya que midieron las resistencias para distancias de 20 mm entre puntos de aplicación de la corriente eléctrica.

En el mismo contexto, Xu y otros (2019) estudiaron la variación de la resistencia eléctrica en la dirección longitudinal en madera de *Liriodendron tulipifera* en función de su contenido de humedad y reportaron una correlación exponencial ($y = a x^b$) entre estas dos variables. Los valores promedio de las resistencias longitudinales de las tres maderas se posicionan relativamente bien respecto a los datos de Slávik y otros (2019), y Xu y otros (2019) (Figura 3), obtenidos con probetas de pequeñas dimensiones y en condiciones experimentales similares a las de la presente investigación.

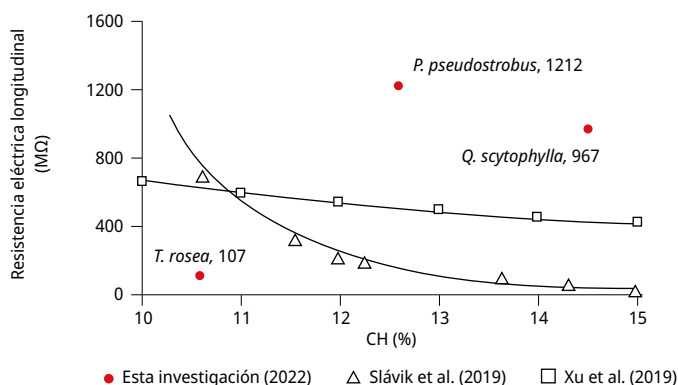


FIGURA 3. Posicionamiento de la resistencia eléctrica de la madera medida en la dirección longitudinal de esta investigación (2022) en comparación con datos de Slávik y otros (2019) y Xu y otros (2019).

Por su parte, Hwang y otros (2021) implementaron un experimento en el cual utilizaron placas de contacto entre el circuito que suministra la corriente eléctrica y la probeta en su sección transversal, semejante al de la presente investigación. Igualmente, estos autores emplearon un medidor de resistencia de corriente directa del mismo tipo que se utilizó en esta investigación.

Resistividad eléctrica

Los resultados de la resistividad eléctrica en las direcciones de anisotropía radial, tangencial y longitudinal de las maderas *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* muestran valores del sesgo estandarizado y apuntamiento estandarizado al interior del intervalo $[-2 < SE, AE < +2]$, corolarios que indican distribuciones normales (Tabla 1). Por su parte, la prueba de verificación de varianza entre las resistividades radiales y tangenciales revela que existe una diferencia significativa ($P_{(\alpha = 0,05)} \geq 2$) entre ellas para las tres especies. Sin embargo, la prueba de verificación de varianza entre las resistencias longitudinal y el promedio medido de las resistencias radial y tangencial demuestra que para *P. pseudostrobus* y *T. rosea* existe una diferencia significativa ($P_{(\alpha = 0,05)} \leq 0,5$), pero no existe diferencia para *Q. scytophylla*.

TABLA 1. Resultados del análisis estadístico de la resistividad eléctrica.

	SE	AE	Ver-Var	Anova	K-W	RM	
<i>Pinus pseudostrobus</i>							
ρ_r	-1,0210	-0,6412	0,6057*	0,8037*	-	x	
ρ_t	-0,4790	-1,1230	-	-	-	x	
ρ_l	0,7292	0,2677	0,0214#	-	<0,0001#	x	
Prom $\rho_r + \rho_t$	-0,7477	-1,0440	-	-	-		x
<i>Tabebuia rosea</i>							
ρ_r	0,8191	-0,0487	0,2526*	0,0015#	-	x	
ρ_t	0,4241	-0,6032	-	-	-		x
ρ_l	1,0290	1,6150	<0,0001#	-	<0,0001#	x	
Prom $\rho_r + \rho_t$	0,4672	-0,3213	-	-	-		x
<i>Quercus scytophylla</i>							
ρ_r	-0,4681	-1,4140	0,0897*	0,0148#	-	x	
ρ_t	0,0839	0,5448	-	-	-		x
ρ_l	1,3480	-0,1244	0,2286*	<0,0001#	-	x	
Prom $\rho_r + \rho_t$	-0,0044	-1,0420	-	-	-		x
<p>ρ = Resistividad eléctrica; r = Dirección radial; t = Dirección tangencial; l = Dirección longitudinal; Prom $\rho_r + \rho_t$ = Resistencia transversal promedio; SE = Sesgo estandarizado; AE = Apuntamiento estandarizado; Ver-Var: Verificación de varianza; Anova = Análisis de varianza; K-W = Prueba de Kruskal-Wallis; RM = Prueba de rangos múltiples; * = No existe diferencia significativa ($P_{(\alpha = 0,05)} > 0,05$); # = Existe diferencia significativa ($P_{(\alpha = 0,05)} < 0,05$).</p>							

Por su parte, las pruebas de análisis de varianza entre resistividades radiales y tangenciales indican diferencias significativas para las tres maderas. Para el caso de las

resistividades promedio versus las longitudinales, solamente para *Q. scytophylla* no existe una diferencia significativa entre estas dos variables. Para las comparaciones restantes, el análisis de varianza y las pruebas de Kruskal-Wallis indican diferencias significativas. En el mismo contexto, las pruebas de rangos múltiples distinguen los valores medios de las resistividades radiales y tangenciales, así como los promedios radial y tangencial versus longitudinal. Un caso diferente son las resistividades radiales y tangenciales de *P. pseudostrobus* que se agrupan sin diferencias significativas.

Los valores de las resistividades muestran diferencias entre las direcciones de anisotropía de la madera y entre las especies estudiadas (Tabla 2). Asimismo, los coeficientes de variación son altos en comparación con otras características físicas de la madera. En particular, los coeficientes de variación de la densidad de la presente investigación muestran valores aceptables para este parámetro al interior de una misma especie (Sotomayor, 2015).

TABLA 2. Densidad, contenido de humedad y resistividad eléctrica.

	ρ_{CH} (kg m ⁻³)	CH (%)	ρ_r (M Ω m)	ρ_t (M Ω m)	$\left(\frac{\rho_r + \rho_t}{2}\right)$ (M Ω m)	ρ_l (M Ω m)
<i>Pinus pseudostrobus</i>						
μ	558	12,6	45,0	46,1	45,5	24,7
σ	20	2,0	15,4	12,6	13,5	6,5
CV	(3,5)	(16,0)	(34,2)	(27,3)	(29,7)	(26,4)
<i>Tabebuia rosea</i>						
μ	557	10,6	8,8	11,9	10,3	2,2
σ	15	3,1	2,4	3,2	2,6	0,5
CV	(2,7)	(28,8)	(27,5)	(26,7)	(25,6)	(21,1)
<i>Quercus scytophylla</i>						
μ	706	14,5	56,7	66,1	61,4	19,6
σ	12	2,0	17,7	19,5	14,9	12,2
CV	(1,7)	(13,7)	(31,2)	(29,5)	(24,3)	(61,9)
ρ_{CH} = Densidad; CH = Contenido de humedad; ρ = Resistividad eléctrica; r = Dirección radial; t = Dirección tangencial; l = Dirección longitudinal; μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en por ciento y entre paréntesis.						

Independientemente de la magnitud de las resistividades eléctricas y la especie en cuestión, el orden de su anisotropía es en promedio: $\rho_l / \rho_r = 0,55$; $\rho_l / \rho_t = 0,54$; y si se compara la anisotropía transversal, representada por el promedio de las resistividades ρ_r y ρ_t versus la resistividad longitudinal ρ_l , esta anisotropía transversal-longitudinal es en promedio de 0,54, valor cercano a la anisotropía ρ_l/ρ_r . Estas estimaciones son similares a

las publicados por Simpson y TenWolde (2010): $\rho_l / \rho_r = 0,55$; $\rho_l / \rho_t = 0,50$, los cuales son aceptados como referencia en tecnología de la madera.

CONCLUSIONES

Se determinaron las resistividades eléctricas de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* en las direcciones radial, tangencial y longitudinal. La estrategia experimental utilizada en la presente investigación es útil para medir la resistencia eléctrica en probetas de madera de pequeñas dimensiones, lo que posteriormente permitió determinar su resistividad. La resistividad eléctrica de las maderas *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* denota un carácter anisotrópico y una variabilidad entre las especies estudiadas.

AGRADECIMIENTOS

Las pruebas de resistividad eléctrica se realizaron en el Laboratorio de Electrónica de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Morelia, Michoacán, México. La investigación fue patrocinada por la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH.

REFERENCIAS

- Casans Berga, S., Garcia-Gil, R., Navarro Anton, A. E. y Rosado-Muñoz, A., 2019. Novel wood resistance measurement method reducing the initial transient instabilities arising in DC methods due to polarization effects. En: *Electronics*, 8(11).
DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics8111253>
- Fediuk, A., Wilken, D., Wunderlich, T. y Rabbel, W. 2020. Physical Parameters and Contrasts of Wooden Objects in Lacustrine Environment: Ground Penetrating Radar and Geoelectrics. En: *Geosciences*, 10(4), 146.
DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences10040146>
- Fernández-Golfin, J., Conde Garcia, M., Fernández-Golfin, J. J., Calvo Haro, R., Baonza Merino, M. V. y De Palacios, P., 2012. Curves for the estimation of the moisture content of ten hardwoods by means of electrical resistance measurements.
En: *Forest Systems*, 21(1), pp.121-127. DOI: <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2112211-11429>
- Fredriksson, M., Thybring, E. E. y Zelinka, S. L., 2021. Artifacts in electrical measurements on wood caused by non-uniform moisture distributions. En: *Holzforschung*, 75(6), pp.517-525. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2020-0138>
- Ganthaler, A., Sailer, J., Bär, A., Losso, A. y Mayr, S., 2019. Noninvasive analysis of tree stems by electrical resistivity tomography: unraveling the effects of temperature, water status, and electrode installation. En: *Frontiers in Plant Science*, 10.
DOI: <http://doi.org/10.3389/fpls.2019.01455>
- Gao, S., Bao, Z., Wang, L. y Yue, X., 2018. Comparison of voltammetry and digital bridge methods for electrical resistance measurements in wood.

- En: *Computers and Electronics in Agriculture*, 145, pp.161-168.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.11.004>
- Gao, S., Yue, X. y Wang, L., 2019. Effect of the degree of decay on the electrical resistance of wood degraded by brown-rot fungi. En: *Canadian Journal of Forest Research*, 49(2), pp.145-153. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0282>
- Grönquist, P., Weibel, G., Leyder, C. y Frangi, A., 2021. Calibration of electrical resistance to moisture content for beech laminated veneer lumber "BauBuche S" and "BauBuche Q". En: *Forests*, 12(5), 635. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12050635>
- Guo, H., Büchel, M., Li, X., Wäckerlin, A., Chen, Q. y Burgert, I. 2018. Dictating anisotropic electric conductivity of a transparent copper nanowire coating by the surface structure of wood. En: *Journal of the Royal Society Interface*, 15(142).
DOI: <http://doi.org/10.1098/rsif.2017.0864>
- Hafsa, W., Angellier, N., Takarli, M. y Pop, O. 2021. A mixed experimental-numerical electrical resistivity-based method for moisture content assessment in wood tested using the example of Douglas fir. En: *Wood Science and Technology*, 55(4), pp.697-718. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-021-01281-x>
- Hwang, S. W., Hwang, S. Y., Lee, T., Ahn, K. S., Pang, S. J., Park, J., Oh, J. K., Kwak, H. W. y Yeo, H., 2021. Investigation of electrical characteristics using various electrodes for evaluating the moisture content in wood. En: *BioResources*, 16(4), pp.7040-7055. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.7040-7055>
- Jakes, J. E., Plaza, N., Stone, D. S., Hunt, C. G., Glass, S. V. y Zelinka, S. L., 2013. Mechanism of transport through wood cell wall polymers. En: *Journal of Forest Products & Industries*, 2(6), pp.10-13.
DOI: https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2013/fpl_2013_jakes002.pdf
- Jiang, Z. H., Chen, Z., Fen, B. H., Hou Z. Q. y Chen, G. H., 2003. Modeling oven-dry softwood resistivity based on the resistor network theory. En: *Holzforschung*, 57(4), pp.415-420. DOI: <https://doi.org/10.1515/HF.2003.061>
- Kirker, G. T., Bishell, A. B. y Zelinka, S. L., 2016. Electrical properties of wood colonized by *Gloeophyllum trabeum*. En: *International Biodeterioration & Biodegradation*, 114, pp.110-115. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.06.004>
- Li, J., Wang, Y., Zhang, J. y Qi, D., 2020. Physical characteristics and fluorescence effect of "environmentally friendly" metallized wood. En: *AIP Advances*, 10, 045133. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5127236>
- Losso, A., Sailer, J., Bär, A., Ganthaler, A. y Mayr, S., 2020. Insights into trunks of *Pinus cembra* L.: analyses of hydraulics via electrical resistivity tomography. En: *Trees*, 34, pp.999-1008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-020-01976-x>
- Luo, Z., Guan, H. y Zhang, X., 2019. The temperature effect and correction models for using electrical resistivity to estimate wood moisture variations. En: *Journal of Hydrology*, 578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124022>
- Martin, T. y Günther, T., 2013. Complex resistivity tomography (CRT) for fungus detection on standing oak trees. En: *European Journal of Forest Resources*, 132(5-6), pp.765-776. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-013-0711-4>
- Otten, K. A., Brischke, C. y Meyer, C., 2017. Material moisture content of wood and cement mortars-Electrical resistance-based measurements in the high ohmic range. En:

- Construction and Building Materials*, 153, pp.640-646.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.090>
- Simpson, W. y TenWolde, A., 2010. Physical properties and moisture relations of wood. Chapter 3. En: Forest Products Laboratory. *Wood handbook-wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190*. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
DOI: <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-190>
- Slávik, R., Čekon, M. y Štefaňák, J., 2019. A nondestructive indirect approach to long-term wood moisture monitoring based on electrical methods. En: *Materials*, 12, 2373.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12152373>
- Sotomayor Castellanos, J. R., 2015. *Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas* [En línea]. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. ISBN: 978-607-00-9036-3. [Consulta: 12 de marzo de 2022].
Disponible en: https://www.academia.edu/12448352/Banco_FITECMA_de_caracter%C3%ADsticas_f%C3%ADsico_mec%C3%A1nicas_de_maderas_Mexicanas
- Suzuki, T., Hasemi, Y., Kamikawa, D., Yasui, N., Kaku, C. y Suzuki, J. I., 2021. Development of dynamic moisture content measurement system for wooden members exposed to fire heating. En: *Japan Architectural Review*, 4(3), pp.431-441.
DOI: <https://doi.org/10.1002/2475-8876.12223>
- Van Blokland, J. y Adamopoulos, S., 2022. Electrical resistance characteristics of thermally modified wood. En: *European Journal of Wood and Wood Products*, 80, pp.749-752.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01813-7>
- Xu, H., Li, Q., Xu, Q., Bao, Z., Wang, L. y Xing, T., 2019. Effects of brown-rot decay on the electrical resistance of wood and its mechanism [En línea]. En: *BioResources*, 14(3), pp.6134-6145. [Consulta: 12 de marzo de 2022]. Disponible en: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2019/06/BioRes_14_3_6134_Xu_XBWX_Effects_Brown_rot_Decay_Electric_Resistance_Wood_14994.pdf
- Zelinka, S. L., Passarini, L., Colon Quintana, J. L., Glass, S. V., Jakes, J. E. y Wiedenhoeft, A. C., 2016. Cell wall domain and moisture content influence Southern Pine electrical conductivity. En: *Wood and Fiber Science*, 48, pp.54-61.
DOI: https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2016/fpl_2016_zelinka004.pdf
- Zhang, J. Y. y Shen, Q., 2019. Processing natural wood into bulk conducting materials. En: *SN Applied Sciences*, 1(12), 1579. DOI: <http://doi.org/10.1007/s42452-019-1572-3>