

Horno Rotatorio para la Estabilización Térmica del Salvado de Arroz

1. Gulo, Héctor D.; 2. Marteau, Silvia A.; 3. Perego, Luis H.

1. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata – Grupo de Investigaciones Agrobiotecnológicas (GIAB), Argentina.
2. Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires – Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata – Grupo de Investigaciones Agrobiotecnológicas (GIAB), Argentina.
3. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata – Grupo de Investigaciones Agrobiotecnológicas (GIAB), Argentina.

Resumen

El salvado de arroz es un subproducto agroindustrial de alto valor nutricional cuya rápida degradación por acción enzimática limita su aprovechamiento. Este estudio evaluó la viabilidad técnica de un horno rotatorio de combustión indirecta como método de estabilización térmica, orientado a su aplicación en contextos agroindustriales medianos. Se diseñó un sistema piloto de 6 m de largo por 0,6 m de diámetro, con calentamiento indirecto y mezcla interna, y se realizaron pruebas comparativas entre salvado tratado y no tratado, analizando el contenido de ácidos grasos libres (AGL) durante el almacenamiento. Los resultados mostraron que el tratamiento en el horno logró reducir significativamente el incremento de AGL respecto al control, manteniendo la calidad del producto. El equipo demostró buena eficiencia térmica, homogeneidad y capacidad operativa. Se concluye que el horno rotatorio representa una alternativa técnica viable, adaptable y potencialmente escalable para la valorización del salvado de arroz, con posibilidad de desarrollo en versiones móviles y mayor alcance territorial.

Palabras clave: Salvado de arroz, Estabilización térmica, Horno rotatorio, Rancidez, Ácidos grasos libres, Secado continuo.

Abstract

Rice bran is a highly nutritious agro-industrial by-product whose rapid enzymatic degradation limits its full utilization. This study assessed the technical feasibility of an indirect combustion rotary kiln as a thermal stabilization method, focusing on its applicability in medium-scale agro-industrial settings. A 6 m x 0.6 m pilot system with indirect heating and internal mixing was developed, and comparative tests were conducted between treated and untreated bran, analyzing free fatty acid (FFA) content during storage. Results showed that thermal treatment significantly reduced the FFA increase compared to control and preserving product quality. The system demonstrated good thermal efficiency, temperature homogeneity, and operational capacity. It is concluded that the rotary kiln is a technically viable, adaptable, and potentially scalable alternative for the valorization of rice bran, with promising opportunities for mobile adaptation and broader deployment in decentralized production contexts.

Keywords: Rice bran, Thermal stabilization, Rotary kiln, Free fatty acids, Rancidity, Continuous drying

Introducción

Relevancia del aprovechamiento del salvado de arroz

El salvado de arroz constituye uno de los subproductos más abundantes del proceso de molienda, representando aproximadamente el 10% del peso total del arroz procesado. Este residuo agroindustrial, con frecuencia desaprovechado, posee una composición nutricional altamente valiosa: es rico en aceites insaturados, proteínas de alta calidad, fibra dietaria y compuestos antioxidantes como tocoferoles y γ -orizanol. Estas características lo posicionan como un ingrediente funcional apto para su incorporación en alimentos, suplementos, piensos balanceados y formulaciones cosméticas (Vargas S. & Aguirre, 2013) (Goufo y otros, 2023) (AOAC (Association of Official Analytical Chemists), 2019).

La valorización del salvado de arroz no solo permitiría reducir pérdidas postcosecha y generar ingresos adicionales en la cadena arrocera, sino que también responde a los lineamientos internacionales de aprovechamiento integral de biomasa agroindustrial y sostenibilidad alimentaria. El desafío actual radica en transformar este subproducto inestable en un insumo seguro, estable y competitivo para diversas aplicaciones (Vargas S. & Aguirre, 2013).

Problema de la rancidez y los ácidos grasos libres (AGL)

El principal obstáculo para el aprovechamiento eficiente del salvado de arroz es su alta inestabilidad debido a la actividad de enzimas lipolíticas, particularmente las lipasas. Estas enzimas, una vez que el pericarpio es removido durante el pulido, entran en contacto con los lípidos presentes y catalizan rápidamente su hidrólisis, generando ácidos grasos libres (AGL) responsables del sabor rancio y del deterioro nutricional del producto (Yilmaz Tuncel , 2024).

Diversos estudios han evidenciado que el salvado crudo puede superar niveles de 10% de AGL en menos de 24 horas desde su obtención, tornándose no apto para consumo humano o industrial. Este proceso de degradación ocurre incluso bajo condiciones ambientales moderadas, lo que limita severamente su transporte, almacenamiento y comercialización. La necesidad de estabilizar térmicamente el salvado de manera rápida y eficiente se vuelve, por tanto, una condición imprescindible para su revalorización (Yilmaz Tuncel , 2024).

Revisión breve de métodos de estabilización tradicionales

A lo largo de las últimas décadas, se han desarrollado múltiples estrategias de estabilización del salvado de arroz, predominantemente térmicas, con el fin de inactivar o reducir la actividad de las lipasas. Entre los métodos más utilizados se encuentran el secado por aire caliente (tostado convencional), el tratamiento con vapor húmedo (vaporeo o autoclave), la extrusión térmica, la aplicación de microondas de alta intensidad y tecnologías emergentes como el calentamiento infrarrojo o el calentamiento óhmico (Goufo y otros, 2023).

Si bien estos métodos han mostrado diversos grados de eficacia en la reducción de AGL durante el almacenamiento, presentan limitaciones relacionadas con su aplicabilidad en contextos descentralizados o en pequeña escala: altos costos, requerimientos de infraestructura fija, necesidad de secados posteriores, o baja capacidad de procesamiento continuo. En este escenario, se torna necesario explorar alternativas que combinen eficacia térmica, bajo costo operativo y adaptabilidad técnica para entornos agroindustriales medianos (Yilmaz Tuncel , 2024) (Vargas S. & Aguirre, 2013).

Justificación del enfoque con horno rotatorio

El horno rotatorio, tradicionalmente utilizado en procesos de secado continuo de sólidos a granel, ofrece una plataforma tecnológica robusta y adaptable para la estabilización térmica del salvado de arroz. Este tipo de equipamiento permite aplicar calor de forma indirecta y homogénea a lo largo de un tambor giratorio, promoviendo un tratamiento

uniforme del material y evitando puntos fríos o sobrecalentamientos locales (Amstronng y otros, 2021).

Además, su carácter modular, continuo y fácilmente escalable lo convierte en una solución viable para implementar in situ, directamente en molinos arroceros de mediana escala o en regiones productoras. Al integrar las etapas de mezcla, secado y avance gravitacional del salvado, el horno rotatorio permite estabilizar grandes volúmenes en poco tiempo, minimizando pérdidas y mejorando la eficiencia energética del proceso. Por estas razones, se propuso adaptar un modelo piloto de horno rotatorio como estrategia alternativa de estabilización térmica, evaluando su desempeño técnico en condiciones controladas (Amstronng y otros, 2021) (Barbeau, 2025).

Objetivo general y objetivos específicos del estudio

Objetivo general:

Desarrollar y evaluar la aplicación de un horno rotatorio piloto como método alternativo de estabilización térmica del salvado de arroz, con énfasis en su eficacia para reducir la rancidez, su viabilidad operativa y su potencial de transferencia tecnológica a escala productiva.

Objetivos específicos:

- Diseñar y adaptar un horno rotatorio de combustión indirecta para el tratamiento térmico del salvado.
- Implementar un sistema piloto con control de temperatura, tiempo de residencia y mezclado interno.
- Realizar pruebas preliminares con salvado fresco para evaluar la reducción de AGL durante el almacenamiento.
- Comparar cualitativa y cuantitativamente los resultados obtenidos con los de métodos tradicionales de estabilización térmica.
- Analizar la escalabilidad, portabilidad y sostenibilidad del sistema propuesto para su eventual aplicación en el ámbito agroindustrial.

Estudios previos sobre métodos térmicos de estabilización

Numerosos trabajos han investigado la efectividad de los tratamientos térmicos para inactivar las enzimas responsables de la degradación del salvado de arroz. Entre los métodos más empleados se destaca el secado por aire caliente, el vaporizado, la extrusión térmica y el calentamiento por microondas.

El secado por aire caliente, utilizado en hornos convencionales o estufas forzadas, ha demostrado ser eficaz para estabilizar el salvado cuando se aplican temperaturas de 100-130 °C durante 1 a 2 horas. Vargas y Aguirre (2013) señalaron que este tratamiento puede reducir significativamente la formación de ácidos grasos libres (AGL) durante el almacenamiento, aunque su eficiencia disminuye en lotes de gran volumen por problemas de distribución térmica.

El vaporizado (vapor húmedo a 100-121 °C) representa uno de los métodos más efectivos para la desnaturalización rápida de lipasas. Pranowo et al. (2023), encontraron que el tratamiento con vapor saturado logró mantener los niveles de AGL por debajo del 6 % hasta por 50 días. Sin embargo, este método implica procesos por lotes y requiere etapas adicionales de secado posterior.

La extrusión térmica, muy difundida a nivel industrial, combina calor, presión y fricción en un tornillo sinfín que calienta el salvado a ~130 °C por pocos segundos. Según Goufo et al. (2023), este procedimiento inactiva instantáneamente las enzimas y permite conservar un salvado con menos de 7 % de AGL durante un año, pero exige maquinaria costosa, infraestructura eléctrica estable y operación especializada.

Finalmente, el calentamiento por microondas ofrece ventajas en velocidad y retención de nutrientes. Yilmaz Tuncel (2024) reporta que potencias de 800-1000 W aplicadas por 4-6 minutos son suficientes para reducir la actividad lipolítica. No obstante, a nivel industrial

aún se presentan desafíos en cuanto a uniformidad del calentamiento y costo de equipos de alta capacidad.

Brechas en la aplicación práctica para pequeños productores

A pesar de la efectividad comprobada de los métodos térmicos mencionados, su adopción en entornos rurales o en molinos arroceros de pequeña y mediana escala es limitada. La mayoría de las tecnologías disponibles fueron diseñadas para operar en contextos industriales, donde se cuenta con equipamiento especializado, personal técnico capacitado y condiciones de infraestructura controladas.

En el caso del vaporizado y autoclave, se requiere una planta generadora de vapor, materiales resistentes a la presión y protocolos estrictos de seguridad, lo cual incrementa significativamente los costos y complica su implementación en regiones sin acceso continuo a servicios básicos.

La **extrusión**, aunque efectiva, demanda altos niveles de inversión inicial, mantenimiento técnico frecuente y consumo eléctrico elevado. Por otro lado, el calentamiento por microondas presenta dificultades de escalado en tratamiento de volúmenes grandes, lo cual limita su viabilidad fuera del laboratorio.

Incluso tecnologías más accesibles como el secado por aire caliente enfrentan restricciones si no se cuenta con sistemas de carga y descarga eficientes, controles de temperatura confiables y atmósferas uniformes dentro de las cámaras de secado. Adicionalmente, muchos de estos procesos se realizan de forma discontinua (batch), lo que representa una barrera operativa cuando se genera salvado en forma constante durante la molienda.

Estas limitaciones dejan a los pequeños productores con pocas opciones prácticas para estabilizar su producción, lo cual resulta en el descarte o subutilización del salvado. En este contexto, es urgente desarrollar soluciones técnicas que combinen continuidad operativa, portabilidad, bajo costo y simplicidad mecánica.

Fundamentación de la elección del horno rotatorio con fuentes actuales

El horno rotatorio ha sido históricamente utilizado en múltiples industrias para el secado y tratamiento térmico de materiales a granel, por su capacidad de operar de forma continua, homogénea y con alta eficiencia energética. Su funcionamiento —basado en un tambor giratorio con flujo de calor directo o indirecto y agitación interna mediante bafles— asegura un tratamiento uniforme de cada partícula del producto, condición esencial para procesos de estabilización térmica.

Según Barbeau (2025) y Armstrong et al. (2021), estos hornos presentan ventajas claves como:

- Capacidad de procesamiento de grandes volúmenes por hora.
- Posibilidad de controlar temperatura, velocidad de giro y tiempo de residencia.
- Compatibilidad con diversas fuentes de calor (gas, biomasa, electricidad).
- Bajo mantenimiento, alta durabilidad y versatilidad de aplicación.

Particularmente en el caso del salvado de arroz, la configuración rotatoria ofrece beneficios específicos: permite evitar puntos fríos o sobrecalentamientos, reduce pérdidas nutricionales y posibilita la integración del secado y estabilización en un solo paso. Además, al poder diseñarse como unidad móvil, facilita su implementación directamente en molinos o centros de acopio, eliminando la necesidad de transporte del salvado crudo —producto extremadamente perecedero—.

Goufo et al. (2023), destacan que tecnologías capaces de modular el perfil térmico y evitar el contacto directo con gases de combustión son clave para preservar compuestos funcionales del salvado como el γ -orizanol y los tocoferoles. En ese sentido, el horno rotatorio de calentamiento indirecto representa una plataforma técnica adecuada para asegurar la calidad final del producto, sin incurrir en los altos costos de tecnologías industriales complejas.

Materiales y Métodos

Descripción del equipo piloto

Para llevar a cabo la estabilización térmica del salvado de arroz, se utilizó un horno rotatorio piloto de combustión indirecta, adaptado para operar en condiciones semiindustriales. El equipo está conformado por un tambor cilíndrico de acero al carbono de 6,0 metros de largo y 0,6 metros de diámetro, montado sobre una estructura con rodillos y anillos de rodadura que permiten su rotación. El tambor posee una inclinación de aproximadamente 3%, que facilita el avance gravitacional del material durante el proceso.

La rotación es generada por un motor eléctrico trifásico de 5,5 HP, conectado a un sistema de reducción que permite ajustar la velocidad de giro en el rango de 4 a 14 RPM. Internamente, el tambor está equipado con baffles deflectores soldados de forma radial, cuya función es levantar y voltear el salvado en cascada, asegurando una mezcla continua y uniforme.

El sistema de calentamiento está constituido por un tubo metálico concéntrico de 0,17 m de diámetro y 7 m de longitud, instalado dentro del tambor. Este tubo actúa como cámara de combustión para un quemador de gas propano, generando una fuente de calor indirecta que transfiere energía térmica al salvado sin contacto directo con los gases de combustión. Para reducir pérdidas térmicas y proteger al operador, el tambor fue recubierto con una manta de fibra cerámica y una chapa de acero perforada.

Condiciones operativas del proceso

Durante las pruebas, se alimentaron lotes de aproximadamente 20 kg de salvado de arroz fresco, con una humedad inicial cercana al 12% (base húmeda). El horno fue precalentado hasta alcanzar una temperatura interna estabilizada entre 110 °C y 130 °C. El tiempo de residencia promedio del salvado en el tambor fue de 10 a 15 minutos, ajustado mediante la inclinación del tambor y la velocidad de rotación.

Las temperaturas internas se monitorearon con termopares dispuestos longitudinalmente en la estructura. El salvado estabilizado fue recolectado a la salida del tambor, enfriado a temperatura ambiente y almacenado en envases herméticos para su posterior análisis.

Análisis del índice de acidez (AGL)

Para evaluar la efectividad del tratamiento, se utilizó el índice de acidez como parámetro indirecto de actividad lipasa. Este índice, expresado como porcentaje de ácidos grasos libres (AGL), se determinó mediante el método de titulación ácido-base con NaOH 0,1 N, conforme a los protocolos estándar de la AOAC (Association of Official Analytical Chemists, 2019).

Se extrajo aceite de las muestras de salvado mediante prensado en frío y disolución en una mezcla etanol-éter. Posteriormente, se realizó la titulación con fenolftaleína como indicador hasta el punto de viraje. Los resultados fueron expresados como porcentaje de ácido oleico equivalente.

Diseño experimental y controles

El diseño experimental consistió en una prueba comparativa entre dos tratamientos: (a) salvado crudo no estabilizado (control negativo) y (b) salvado tratado en el horno rotatorio. Ambas muestras fueron almacenadas a temperatura ambiente (~25 °C) durante una semana y luego analizadas.

Por tratarse de una etapa piloto, los ensayos se realizaron en duplicado. Si bien los resultados son de carácter preliminar, permitieron establecer diferencias claras en el comportamiento oxidativo de ambas muestras. En futuras fases, se prevé aumentar el número de réplicas y aplicar análisis estadísticos más rigurosos para validar la consistencia del tratamiento.

Consideraciones de seguridad y sostenibilidad

Durante la operación se establecieron medidas de seguridad relacionadas con el manejo del gas, control de temperatura de superficie, y evacuación de gases residuales. El aislamiento térmico externo cumplió una doble función: proteger al operador de superficies calientes y optimizar la eficiencia energética del sistema.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, el horno fue diseñado con posibilidad de adaptación a fuentes de calor alternativas como biomasa. En particular, se contempla el uso de cáscara de arroz como combustible renovable en etapas futuras, lo cual permitiría cerrar el ciclo de valorización de residuos dentro de la misma cadena productiva (Goufo et al., 2023).

Procedimiento experimental detallado y parámetros adicionales

Previo al inicio de cada prueba, se verificó el estado del sistema mecánico, el encendido seguro del quemador y el correcto montaje del tambor con sus elementos internos de agitación. El salvado de arroz fresco fue alimentado manualmente al tambor mediante una tolva metálica con compuerta controlada, cuidando de no sobrecargar el sistema para asegurar la rotación sin bloqueos. Se utilizó equipo de protección personal (guantes térmicos, gafas, mascarilla respiradora y ropa ignífuga) durante la operación del horno.

La masa procesada en cada ensayo fue de 20 kg, con humedad inicial estimada en 12 %. Se estableció una temperatura interna de trabajo entre 110 °C y 130 °C, controlada mediante termopares y regulada a través del flujo de gas. El tiempo de residencia fue ajustado entre 10 y 15 minutos en función del caudal de alimentación y la velocidad de rotación (aproximadamente 10 RPM).

Además del índice de acidez, se midió el contenido de humedad residual en el salvado estabilizado utilizando una balanza de humedad infrarroja (OHAUS MB23), siguiendo el procedimiento estándar de pérdida por secado a 105 °C hasta peso constante (AOAC (Association of Official Analytical Chemists), 2019).

Aunque no se evaluaron formalmente otros parámetros de calidad organoléptica, se registraron observaciones cualitativas respecto al color, olor y textura del salvado luego del tratamiento térmico. Se evidenció una reducción del olor rancio en el salvado tratado, así como una coloración castaña claro-homogénea sin signos de carbonización.

Dado el carácter exploratorio del estudio, las pruebas se realizaron en duplicado, priorizando el análisis comparativo preliminar entre el tratamiento y el control. Para etapas futuras se proyecta aplicar análisis estadísticos con mayor número de réplicas, incluyendo parámetros fisicoquímicos adicionales como contenido de orizanol, tocoferoles y compuestos fenólicos (Goufo y otros, 2023).

Resultados

Reducción del índice de acidez en salvado estabilizado

Los ensayos preliminares permitieron comparar el comportamiento del salvado tratado térmicamente con el horno rotatorio frente a una muestra control no estabilizada, ambas almacenadas durante siete días a temperatura ambiente. El índice de acidez (AGL), expresado como porcentaje de ácidos grasos libres en base al contenido de ácido oleico, mostró una diferencia significativa entre ambos tratamientos.

A continuación, se presenta la Tabla 1, que resume los valores promedio de AGL obtenidos en cada muestra, medida al día 0 y al día 7 de almacenamiento:

Tratamiento	Día 0 (% AGL)	Día 7 (% AGL)
Salvado no tratado	2,1	9,8
Salvado tratado (horno rotatorio)	2,2	4,3

Tabla 1. Porcentaje de ácidos grasos libres en salvado crudo y tratado con horno rotatorio. Elaboración propia a partir de análisis en duplicado.

Los valores muestran que el salvado no tratado experimenta una duplicación del AGL en menos de una semana, mientras que el producto estabilizado presenta un incremento mucho menor, manteniéndose dentro de niveles aceptables para uso alimentario.

Evolución del AGL durante el almacenamiento

La Figura 1 ilustra gráficamente la evolución del AGL a lo largo del tiempo para ambos tratamientos, lo cual permite visualizar el impacto del tratamiento térmico en la tasa de lipólisis en el salvado.

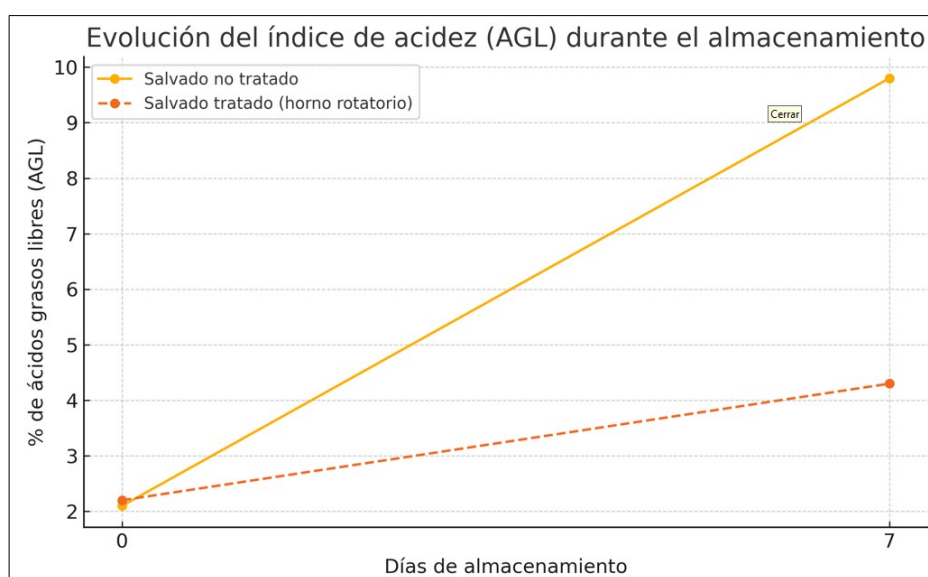


Figura 1. Elaboración propia.

El perfil de la curva muestra un crecimiento exponencial del AGL en el salvado crudo, mientras que en la muestra tratada la pendiente es mucho más moderada, lo cual evidencia una reducción sustancial de la actividad enzimática.

Condiciones térmicas y contenido de humedad final

Durante el tratamiento térmico, las temperaturas internas registradas a lo largo del tambor oscilaron entre 110 °C y 130 °C, con una desviación térmica máxima de ± 5 °C en los puntos de medición, lo que confirma una homogeneidad térmica adecuada para el proceso de estabilización. Este resultado es consistente con la distribución de baffles internos y el diseño del sistema de combustión indirecta.

El contenido de humedad en el salvado al finalizar el proceso se redujo de aproximadamente 12 % (inicial) a valores entre 6 % y 7 %, medido por pérdida por secado en balanza de humedad. Estos niveles de humedad final se consideran óptimos

para inhibir el crecimiento microbiano y prolongar la vida útil del producto, sin afectar sus propiedades funcionales.

Diseño básico del sistema

Previamente a las modificaciones realizadas sobre el horno se realizó el cálculo de diseño básico para la adaptación del horno a la experiencia. Figuras 2 y 3

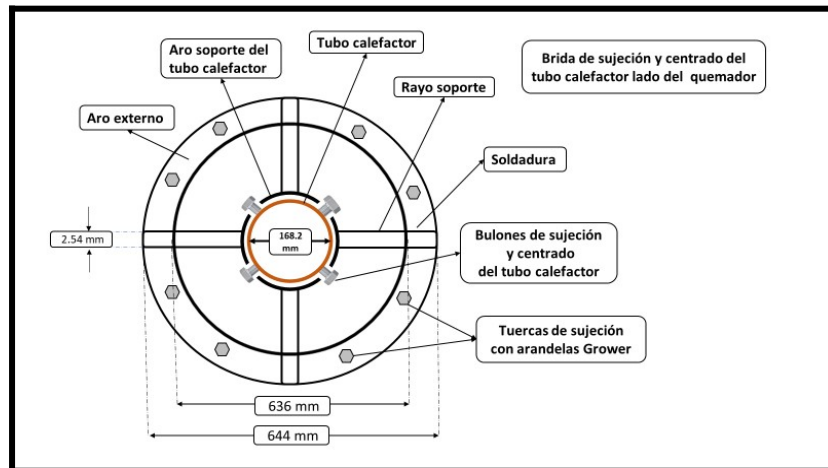


Figura 2 - Elaboración propia

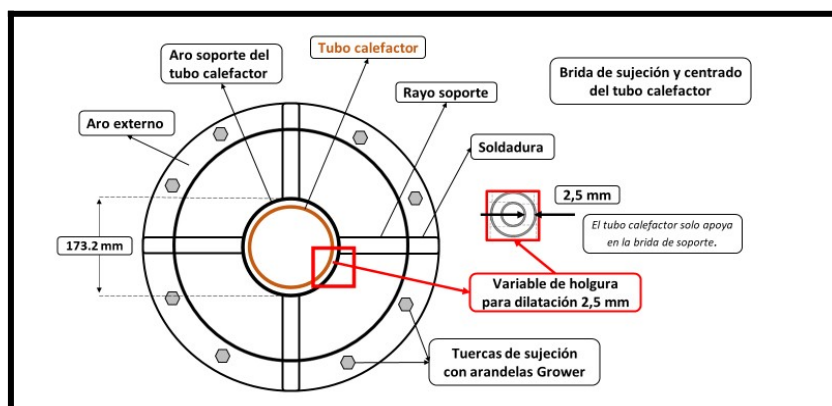


Figura 3 - Elaboración propia

Documentación visual del proceso

Durante la implementación del horno rotatorio piloto, se tomaron fotografías representativas del sistema. Las imágenes muestran tanto el equipo como detalles de la cámara de combustión, el tambor y la tolva de carga.



Imagen 1. Horno rotatorio de acero inoxidable, montado sobre rodillos y chasis. Elaboración propia



Imagen 2. Motor instalado en el chasis con engranaje reductor de transmisión y tolva de carga. Elaboración propia.



Imagen 3. Vista de la cámara de combustión y tubo de escape de gases del horno rotativo . Elaboración propia

Discusión

Comparación con otros métodos de estabilización

Los resultados obtenidos mediante el uso del horno rotatorio piloto evidencian una reducción significativa en la formación de ácidos grasos libres (AGL) durante el almacenamiento del salvado de arroz. Esta reducción fue lograda con un tratamiento térmico continuo, a temperaturas controladas de entre 110 y 130 °C, sin recurrir a equipamientos de alta presión ni tecnologías eléctricas sofisticadas.

En comparación con métodos tradicionales como el vaporizado o la extrusión, el horno rotatorio presenta ventajas destacables en términos de simplicidad operativa, bajo requerimiento de infraestructura y mayor portabilidad. Mientras que la extrusión térmica requiere inversiones considerables en equipos, operadores especializados y acceso estable a electricidad trifásica, el sistema de horno rotatorio puede funcionar con gas propano o incluso con biomasa, ofreciendo una solución descentralizada adaptable a distintas escalas productivas.

El tratamiento con vapor húmedo, aunque eficaz, implica riesgos operativos asociados al manejo de presión y requiere una etapa posterior de secado, lo que incrementa los costos y complica la logística en entornos rurales. En cambio, el horno rotatorio permite realizar secado y estabilización en una única etapa, con menor consumo energético global y sin necesidad de manipulación intermedia del producto.

En cuanto al calentamiento por microondas, si bien es una tecnología emergente con buenos resultados a nivel de laboratorio, aún presenta limitaciones de escalado, distribución térmica heterogénea y alto costo unitario de implementación, lo que restringe su aplicabilidad en ámbitos productivos medianos o pequeños.

Impacto potencial en la industria arrocera regional

La implementación de un horno rotatorio portátil o semifijo representa una oportunidad concreta para resolver uno de los principales cuellos de botella en la valorización del salvado de arroz: su rápida degradación por lipólisis. La posibilidad de estabilizar térmicamente el subproducto directamente en los establecimientos de molienda permitiría reducir las pérdidas postcosecha, diversificar los productos obtenidos y habilitar nuevos destinos comerciales del salvado, tanto en la alimentación humana como animal.

En regiones con fuerte presencia arrocera —como el noreste argentino, Paraguay, Uruguay o el sur de Brasil—, donde muchas plantas operan con infraestructura básica y sin acceso a métodos industriales de estabilización, el sistema propuesto podría constituir una tecnología intermedia apropiada, escalable y de bajo riesgo. Además, al disminuir la formación de AGL, se extiende la vida útil del salvado y se habilita su almacenamiento y transporte sin refrigeración, facilitando su inserción en cadenas de valor más amplias.

Limitaciones del estudio

Si bien los resultados obtenidos son alentadores, deben considerarse ciertas limitaciones metodológicas propias de una etapa piloto:

- Número reducido de réplicas: los ensayos se realizaron en duplicado, lo que no permite aplicar inferencias estadísticas robustas ni evaluar la variabilidad entre lotes de salvado.
- Duración del almacenamiento limitada: el seguimiento de la evolución del AGL se restringió a siete días. Si bien esta ventana inicial es útil para detectar diferencias significativas, no permite concluir sobre el comportamiento a largo plazo del producto.

- Falta de caracterización nutracéutica: no se incluyeron mediciones específicas de compuestos funcionales como tocoferoles, γ -orizanol o antioxidantes, parámetros clave para valorar el impacto del tratamiento térmico sobre la calidad funcional del salvado.
- Análisis organoléptico limitado: si bien se observaron cambios en el color y el olor, no se realizaron mediciones cuantitativas ni análisis sensorial formalizados.

Estas limitaciones no invalidan los resultados, pero marcan la necesidad de continuar con evaluaciones más extensas y controladas.

Posibilidades de mejora del sistema piloto

El diseño actual del horno rotatorio piloto ha demostrado ser funcional y seguro, pero presenta oportunidades claras de optimización técnica y operativa:

- Incorporación de controladores automáticos de temperatura y velocidad para mejorar la precisión del proceso y la reproducibilidad entre lotes.
- Implementación de sensores de humedad en línea que permitan ajustar dinámicamente el tiempo de residencia en función de la humedad residual del salvado.
- Mejora del sistema de alimentación y descarga para aumentar la capacidad operativa y reducir la intervención manual.
- Evaluación del uso de biomasa como fuente de calor, utilizando cáscara de arroz u otros subproductos lignocelulósicos, lo cual permitiría avanzar hacia un modelo energético más autosuficiente y sustentable.

Asimismo, se proyecta el desarrollo de una versión móvil del equipo, montada sobre tráiler o plataforma rodante, que pueda ser trasladada directamente a plantas de molienda rurales o cooperativas productoras.

Conclusiones

Se desarrolló y evaluó un sistema piloto de horno rotatorio para la estabilización térmica del salvado de arroz, integrando criterios de diseño y operación obtenidos de experiencias previas. El estudio confirmó la importancia crítica del problema de la rancidez en el salvado y sistematizó los métodos tradicionales de estabilización, destacando sus limitaciones en cuanto a escalabilidad, portabilidad y aplicabilidad en entornos productivos medianos o pequeños.

El horno construido (6 m \times 0,6 m, con sistema de calentamiento indirecto mediante tubo interno y recubrimiento aislante) demostró capacidad técnica para inactivar las lipasas del salvado en tiempos reducidos. Los ensayos preliminares revelaron que, tras siete días de almacenamiento, el salvado tratado térmicamente mantenía niveles de AGL notablemente más bajos que el salvado no estabilizado, lo que evidencia la eficacia del tratamiento.

Comparado con métodos como el secado por aire caliente o el vaporizado, el horno rotatorio logró resultados similares en términos de detención de la rancidez, pero con ventajas operativas importantes: operación continua, mayor volumen procesado y facilidad de integración al flujo de molienda. Estas características lo posicionan como una alternativa práctica y de bajo costo para su adopción en plantas arroceras regionales.

El estudio reafirma que es técnicamente viable implementar tecnologías de secado rotatorio en el ámbito agroindustrial para valorizar subproductos perecederos como el salvado de arroz. Además, se identificaron oportunidades de mejora que fortalecen el sistema: ajustes en la alimentación, monitoreo automático de temperatura y exploración del uso de biomasa como fuente térmica.

Entre las proyecciones futuras se destacan:

- La validación del sistema a lo largo de períodos de almacenamiento extendidos y en condiciones ambientales variables.

- La caracterización de propiedades nutricionales y funcionales post-tratamiento, como el contenido de γ -orizanol y antioxidantes.
- La comparación directa con métodos como extrusión o microondas bajo criterios energéticos, económicos y de calidad.
- La transferencia tecnológica del equipo en formato móvil, que permita realizar la estabilización in situ, mejorando la frescura del producto final y reduciendo los costos logísticos.

Finalmente, se vislumbra la posibilidad de extender la aplicación del horno rotatorio a otros subproductos agroindustriales con potencial de valorización, ampliando así su impacto en la sostenibilidad del sistema alimentario regional.

Bibliografía

- Amstrong, T., dePinho, L., Andräss, S., & Zschiesche, W. (8 de marzo de 2021). *Sludge Processing*. Dynamis "D-Flame® Burner: High Quality Clinker has its Burner": <https://www.sludgeprocessing.com/process-and-operation/thickening-dewatering-drying/drying/rotary-drum-dryers/#:~:text=Rotating%20drum%20%E2%80%93%20or%20rotary,the%20length%20of%20the%20drum>
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). (2019). *AOAC (Association of Official Analytical Chemists)*. AOAC.
- Barbeau, C. (18 de Abril de 2025). *Processing*. Powder Show preview with Hatch's Colin Barbeau: <https://www.processingmagazine.com/home/video/55284408/powder-show-preview-with-hatchs-colin-barbeau>
- Goufo, P., Beaulieu, J., Ming-Hsuan, C., & Wenefrida, I. (2023). *Exploiting the Rice Germplasm for Health-Promoting and Value-Added Foods*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/books978-3-7258-2364-2>
- Pranowo, D., Tsamara, D., & Sukardi, S. (2023). Rice Bran Stabilization Using Autoclave and Optimization of Crude Rice Bran Oil Recovery Using Ultrasound-Assisted Extraction. *BioResources*, *18*(4), 8341-8361. <https://doi.org/10.15376/biores.18.4.8341-8361>
- Vargas S., E., & Aguirre, M. (2013). Procesos de estabilización del salvado de arroz colombiano para su aprovechamiento industrial. *Revista Mutis*, *3*(2), 13-20. <https://doi.org/https://doi.org/10.21789/22561498.881>
- Yilmaz Tuncel, N. (2024). Estabilización de Rice Bran: A Review. *Foods*, *12*(9), 2-21. <https://doi.org/10.3390/foods12091924>