Revista de

Ingeniería en Industrias Alimentarias

ISSN: En trámite

JULIO-DICIEMBRE

Año 2/Núm. 2/2025

Artículos

Diseño y elaboración de una botana saludable adicionada con proteína no convencional

Diseño teórico de una planta alimentaria para la producción de jarabe de agave sabor arándano

Evaluación ambiental de la producción de frijol de riego y temporal en Guanajuato: una alternativa de valorización

CFD simulation basis for an industrial malt germinator

Análisis del esquema de interpolación en la formación de ensuciamiento de leche en un sistema helicoidal

Difusión vía red de cómputo: www.revistaiia.mx

Directorio

Mtro. Ramón Jiménez López
Director General
Tecnológico Nacional de México

Ing. Raúl René Robles Lacayo
Director
TecNM/I. T. Roque

Mtra. Wendy Mondragón Moreno
Subdirectora Académica
TecNM/I. T. Roque

Mtro. Fernando Germán Flores Guillén
Subdirector Administrativo
TecNM/I. T. Roque

Mtro. Alejandro Guerrero Barrón
Subdirector de Planeación y Vinculación
TecNM/I. T. Roque

M. C. Violeta Herrera Enciso
Jefa del Departamento de Ingenierías
TecNM/I. T. Roque

EDITORES
Formadores:

Editor General
Dr. Christian Oliver Díaz Ovalle

Editor Ejecutivo
Dr. Ahuitzolt de Jesús Joaquín Ramos

COMITÉ EDITORIAL

Química de Alimentos
Dr. José Alberto Gallegos Infante
TecNM/I.T. Durango, Durango, México

Bioprocesos y Biotecnología de Alimentos
Dr. José Ángel Huerta Ocampo
Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C., Hermosillo, Sonora, México

Postcosecha y Tecnología Agroalimentaria
Dra. María Janeth Rodríguez Roque
Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México

Seguridad e Inocuidad Alimentaria
Dra. Montserrat Hernández Iturriaga
Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México

Revista de Ingeniería en Industrias Alimentarias, año 2, núm. 2, julio-diciembre de 2025, es una publicación semestral editada por el **Tecnológico Nacional de México**, Av. Universidad 1200, Col. Xoco, Alcaldía Benito Juárez, C.P. 033305, Ciudad de México. Teléfono **5536002511 Ext. 65092**. Página electrónica de la revista: www.revistaiia.mx. Correo electrónico: **riia.editor@roque.tecnm.mx**. Editor Responsable: **Dr. Christian Oliver Díaz Ovalle**. Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo **No. 04-2025-031114474700-102**, ISSN: **(en trámite)**— ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: **Lic. Thamara Molina Grimaldo**, Departamento de Comunicación y Difusión, Instituto Tecnológico de Roque, km. 8.0 carretera Celaya-Juventino Rosas, C.P. 38124, Celaya, Guanajuato, México. Fecha de última modificación: **22 de diciembre de 2025**. Tamaño del archivo **2,320 KB.**

El objetivo de la Revista de Ingeniería en Industrias Alimentarias es generar un espacio para la difusión de conocimiento científico, tendencias y novedades en la tecnología y ciencia de los alimentos, el aprendizaje y difusión en los avances de la industria alimentaria.

La revista acepta, para publicación en español e inglés, artículos de: divulgación, difusión, avance técnico-científico, revisión, educación y opinión de expertos. Estos son sometidos a revisión editorial y de lenguaje. Se aplicará arbitraje por pares a los artículos científicos y artículos de revisión, el proceso de evaluación del artículo guardará estrictamente el anonimato y el contenido es responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan la postura de los editores de la publicación. Se autoriza la reproducción parcial o total de los contenidos e imágenes de la publicación con crédito de la fuente.

Editorial

A lo largo de la historia, el ser humano ha implementado sistemas biológicos para desarrollar, mantener o cambiar las características de los alimentos. Culturas antiguas, como los mesopotámicos y los egipcios, sin saberlo, implementaban el concepto de biotecnología definida en el uso de entes biológicos, o partes de ellos, para el desarrollo de productos o mejora de procesos en el beneficio colectivo. De esta manera y a lo largo del tiempo, la biotecnología evolucionó desde prácticas empíricas hasta ser una ciencia multidisciplinaria, la cual apoya la innovación, tecnología e ingeniería de los alimentos; desafortunadamente, esta disciplina ha sido relacionada con organismos genéticamente modificados y transgénicos, pero son trascendentes sus aportaciones a las diferentes áreas de la cadena de suministros alimentarios, desde la producción de la materia prima hasta la disposición al consumidor. Todo esto ha tomado en cuenta aspectos importantes como la calidad, inocuidad, sostenibilidad y seguridad alimentaria.

En este tenor, el Tecnológico Nacional de México dispone de licenciaturas y posgrados, coma la carrera de Ingeniería en Industrias Alimentaria, que resaltan el aporte de la biotecnología a la ciencia de los alimentos. Este número presenta algunas de las aplicaciones de la biotecnología en la transformación y producción de alimentos a nivel industrial.

Los editores agradecen a los autores por sus contribuciones, a los revisores por su tiempo invertido y a la Administración del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Roque por el apoyo brindado durante la publicación del presente número.

Ahuitzolt de Jesús Joaquín Ramos
Christian Oliver Díaz Ovalle.
Editores

CONTENIDO

Diseño y elaboración de una botana saludable adicionada con proteína no convencional 1
Cristhian Omar Pérez Gámez y Ma. Cristina Vázquez-Hernández
ARTÍCULO TECNOLÓGICO

Diseño teórico de una planta alimentaria para la producción de jarabe de agave sabor arándano 8
Omar Isai Cruz León, Cristian Cerritos Rodríguez, Erika Ramos Ojeda y Laura Isabel Pérez García
ARTÍCULO TECNOLÓGICO

Evaluación ambiental de la producción de frijol de riego y temporal en Guanajuato: una alternativa de valorización 12
José Ramón Castellanos-Castro, José Enrique Botello-Álvarez, Alfredo Josué Gámez-Vázquez, Roberto Carlos Salmorán-Salgado y María Teresa Maldonado-Mancera
ARTÍCULO DE CIENTÍFICO

CFD simulation basis for an industrial malt germinator 21
María José Ramírez-Rivera, Christian O. Díaz-Ovalle*, Cesar L. Aguirre-Mancilla y Ma. Cristina Vázquez-Hernández
ARTÍCULO DE CIENTÍFICO

Análisis del esquema de interpolación en la formación de ensuciamiento de leche en un sistema helicoidal 25
Ana Camila Palacios-Soto, María José Ramírez-Rivera y Erika Ramos-Ojeda
ARTÍCULO DE CIENTÍFICO

Revista de
Ingeniería en Industrias Alimentarias

ARTÍCULO TECNOLÓGICO

DISEÑO Y ELABORACIÓN DE UNA BOTANA SALUDABLE ADICIONADA CON PROTEÍNA NO CONVENCIONAL

Cristhian Omar Pérez Gámez y Ma. Cristina Vázquez-Hernández[*].

RESUMEN

En México, existe una grave problemática en la prevalencia de enfermedades crónico-degenerativas no transmisibles como obesidad, diabetes, hipertensión arterial, desnutrición y cáncer, asociadas al consumo de alimentos "chatarra", los cuales se caracterizan por su alto contenido calórico y bajo contenido nutrimental. El objetivo del presente trabajo es el diseño y elaboración de una botana con alto valor nutrimental utilizando subproductos agrícolas con adición con proteína no convencional (*Tenebrio molitor*). La elaboración definió una formulación base a partir para determinar 3 formulaciones candidatas y posteriormente el diseño del empaque y etiqueta fue desarrollado. El resultado fue una botana tipo papa horneada sin grasas ni aditivos ni conservadores adicionados en una presentación de 60 g de producto a precio de venta de 24.86 MXN bajo un margen de utilidad de 30%.

Palabras clave

Economía circular, Entomofagia, revalorización.

ABSTACT

Mexico presents a serious problem in the prevalence of non-communicable chronic degenerative diseases such as obesity, diabetes, arterial hypertension, malnutrition and cancer, associated with the consumption of "junk" foods, which are characterized by their high caloric and low nutritional content. This work defines the design and elaboration of a snack with high nutritional value using agricultural by-products and addition of non-conventional protein (*Tenebrio molitor*). The elaboration considers a base formulation to determine 3 candidate formulations were made, and the packaging and label were designed. As a result, a baked potato-type snack was obtained, without added fats, additives or preservatives in a presentation of 60 g of product and with a selling price of $ 24.86 MXN (Profit margin of 30%).

Keywords

Circular economy, Entomophagy, revaluation.

Departamento de Ingenierías. Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Roque. Km 8 Carretera Celaya-Juventino Rosas. Roque, Celaya, Guanajuato, 30110, México.
[*]Autor de correspondencia: ma.vh@roque.tecnm.mx

1. Introducción

En 2022, ENSANUT (Encuesta Nacional de Salud y Nutrición en México) reporto que el 75% de los adultos mexicanos vive con sobrepeso u obesidad, también mostró que el 18.4% de la población mayor de 20 años padece diabetes, este porcentaje se ve incrementado a medida que aumenta la edad de la población. Por otra parte, esta encuesta mostró que el 36.5% los niños en edad escolar (6–13 años) y el 40.4% de los adolescentes (13-18 años) presentan sobrepeso y obesidad. Sumado a lo anterior, 14.2% de los niños menores de 5 años presentaron desnutrición crónica (Talla baja). Este panorama es preocupante y es el resultado principalmente del consumo de alimentos con bajo contenido nutrimental y alto contenido calórico conjuntamente con el sedentarismo, lo cual ha ocasionado una grave situación al sistema de salud público. Este patrón alimentario ha contribuido al aumento de factores de riesgo metabólicos y a la disminución de la calidad de vida de la población. La entrada en vigor de la nueva ley que prohíbe la venta y distribución de comida chatarra en escuelas (29 de marzo de 2025) representa un avance significativo para cambiar la alimentación y contrarrestar los alarmantes índices de obesidad, sin embargo, en nuestro país todavía existe un gran vacío en el mercado de productos saludables, funcionales y atractivos para niños, jóvenes y adultos, la mayoría de las alternativas disponibles siguen siendo ultraprocesadas y poco nutritivas lo que genera insatisfacción y desconfianza para los consumidores (GOB, 2025; Gaona-Pineda et al., 2023). Ante esta problemática, la búsqueda de alternativas alimenticias saludables y accesibles se ha convertido en una prioridad (On-Nom et al., 2023). El desarrollo de productos alimenticios de alta demanda que puedan consumirse fácilmente incluso como un snack (Botana) con alto valor nutrimental, utilizando subproductos agrícolas y fuentes de proteína no convencionales como las provenientes de los insectos surge como una estrategia innovadora para mejorar la calidad de la dieta y combatir tanto la desnutrición (malnutrición) como el exceso de peso y disminuir la incidencia de enfermedades crónico-degenerativas (Euan-Pech et al., 2024).

El aprovechamiento de residuos agroindustriales para el diseño y elaboración de alimentos que además de satisfacer el hambre aporten un beneficio a la salud representa una estrategia fundamental para mejorar la sostenibilidad y la seguridad alimentaria. En particular, las colillas de camote (*Ipomoea batatas*) que incluyen fragmentos de tubérculo, cáscaras, tallos y hojas que son descartados por no cumplir con las especificaciones de calidad durante la cosecha y procesamiento pueden ser una materia prima de alto valor nutrimental para la innovación de alimentos y revalorización de desechos. Estos residuos son una fuente rica de compuestos bioactivos como antocianinas, polifenoles, carotenoides, fibra dietética y minerales esenciales por lo cual pueden mejorar el perfil antioxidante, antiinflamatorio y prebiótico de los productos alimenticios (Jiang et al., 2024; Rosell et al., 2024). El garbanzo (*Cicer arietinum*) y la flor de Jamaica (*Hibiscus sabdariffa*) representan ingredientes agroindustriales de alto valor para el desarrollo de alimentos con características funcionales (Jabeur et al., 2017; Villalobos-Vega et al., 2023). El garbanzo es una leguminosa con alto contenido proteico, que además aporta fibra dietética, folato, vitamina E y minerales (Hierro, Zinc, Magnesio, entre otros), su incorporación en botanas, bebidas y productos horneados permite mejorar la textura, perfil nutricional y aceptabilidad sensorial (Kumar et al., 2025). Por otro lado, la flor de Jamaica es rica en antocianinas, polifenoles, flavonoides y vitamina C, estos compuestos confieren capacidad antioxidante y su adición a las formulaciones de alimentos contribuye a mejorar la palatabilidad (López-Cardoso et al., 2025).

Tenebrio molitor (Gusano de la harina) es un insecto perteneciente al orden Coleoptera y a la familia Tenebrionidae. Su ciclo de vida incluye las etapas de huevo, larva, pupa y adulto, siendo la fase larval la utilizada para consumo humano y animal (Kotsou et al., 2023) (Figura 1). En los últimos años *T. molitor* ha cobrado relevancia mundial como fuente alternativa y sostenible, su reproducción y cría es relativamente sencilla y tiene una alta eficiencia en la conversión de subproductos agrícolas en biomasa y bajo impacto ambiental, por lo cual se posiciona como una solución innovadora ante los desafíos de la seguridad y autosuficiencia alimentaria, así como en la sostenibilidad (Djouadi et al., 2022). En 2015 la Unión Europea a través de la agencia EFSA (Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria) lo reconoció en la lista de insectos con alto potencial como alimento novedoso, además de considerarlo como seguro para su consumo (Errico et al., 2021). Las larvas de *T. molitor* destacan por su alto contenido de proteína (20-50% peso seco) de la cual aproximadamente el 80% es digerible, presentan un perfil completo de aminoácidos esenciales, así como una proporción significativa de grasas saludables, principalmente ácidos grasos insaturados como oleico y linoleico. Además, aporta vitaminas (A, C y Complejo B),

minerales como Hierro, Zinc, Cobre, Magnesio y Fosforo, contiene fibra insoluble (Quitina) con función de prebiótico con posibles beneficios inmunológicos y funcionales (Herdeiro et al., 2024).

El objetivo de la investigación fue diseñar, elaborar y analizar la factibilidad de producir un snack (Botana) saludable a partir de subproductos agroindustriales (Colillas de camote) utilizando harina de *T. molitor* como fuente de proteína no convencional, harina de garbanzo (Proteína vegetal) y flor de Jamaica como fuente de antioxidantes, ofreciendo al consumidor un alimento con características funcionales que pueda ser una alternativa a los productos similares existentes en el mercado los cuales son considerados "Alimentos chatarra". Gaona-Pineda et al. (2023) indicaron que cerca del 60% de la población menor de 20 años consume botanas, dulces y postres de forma cotidiana.

Figura 1. Etapas de crecimiento del *Tenebrio molitor*.

2. Materiales y métodos

El presente proyecto fue realizado en las instalaciones del Tecnológico Nacional de México en Roque. Se realizó un estudio de mercado utilizando un instrumento de 14 ítems el cual fue diseñado en la aplicación de Google Forms y compartido en línea para evaluar su aceptación en el mercado. El instrumento fue aplicado a 75 personas (15 a más de 30 años) de las cuales el 30.7% pertenecen al género masculino, 68% al género femenino y el 1.3% prefirió no decir su género. El material biológico (Camote, garbanzo y jamaica) fue cultivados en las parcelas didácticas de la institución durante el ciclo primavera-otoño 2024 y proporcionados por el M.C. Luis A. Noriega González, las larvas de *Tenebrio molitor* fueron proporcionadas por el Dr. Francisco Rodríguez Rodríguez Profesor Investigador del INIFAP campus Bajío. El garbanzo fue colocado en remojo en agua por 8 horas para eliminar los azúcares fermentables (Estaquiosa, rafinosa y vermascosa) posteriormente fueron sometidos a cocción con los residuos del camote y las flores de Jamaica previamente lavadas y desinfectadas durante 30-35 minutos a temperatura de ebullición (100°C), posteriormente se procesaron una licuadora marca NINJA a velocidad alta para la obtención de una pasta, según la metodología propuesta por Melgoza-Villagómez et al. (2022). A partir de una formula base se realizó el diseño de las formulaciones modificando los ingredientes y para la optimización de las fórmulas fue utilizado el complemento SOLVER de Excel (Santiago-Ramos et al., 2017). Posterior a la elaboración del snack fue realizado un análisis sensorial (Análisis sensorial nivel consumidor, prueba de perfil sensorial con 52 panelistas no entrenados, aplicando una escala de Likert de 5 puntos (Pedrero & Pangborn, 1989). Posteriormente se realizó el diseño de la tabla nutrimental teórica con base en el Sistema Mexicano de Equivalentes (Pérez & Palacios, 2022).

3. Resultados y discusión

Los resultados del análisis de mercado mostraron que el 88% de las personas encuestadas les parece atractivo un alimento que muestre un mensaje de sostenibilidad, el 76% se interesa en el producto por contener ingredientes derivados de insectos, sin embargo, el 9.3% respondió que este tipo de productos les generaba rechazo. Cabe mencionar, que el 85.4% de los participantes de este estudio se muestran interesados en un alimento (snack o botana) que sea sostenible o tenga

bajo impacto ambiental. Además, el 80% comento que estaría dispuesto a pagar por un paquete de 30 a 50 gramos de producto entre $10.00 MXN y $20.00 MXN. Con respecto al ítem de consumo previo de productos alimenticios elaborados con subproductos industriales, el 57.3% respondió que, si había consumido este tipo de alimentos, el 22.7% no los ha consumido y el 20% no está seguro de haberlo hecho. Dentro de los ítems del instrumento para el diseño del empaque del producto, se preguntó a los encuestados *¿Qué información les gustaría ver en el empaque de un producto alimenticio?,* como se observa en la Figura 2 el 73.3% comentó que su interés son los beneficios nutricionales. Como resultado de la investigación y utilizando la técnica de lluvia de ideas se propuso el nombre comercial de "TOSTIK MUNCH", este nombre representa el tipo de producto que se ofrecerá al público, es una botana en forma de "Chips" es decir una tostada pequeña y crujiente, se realizó una búsqueda fonética y escrita en la página del IMPI (Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial) en donde se encontraron 0 coincidencias, es decir que nombre se encuentra disponible para su registro (IMPI, 2025).

A partir de la formula base se realizó la optimización de la formulación para la elaboración de los snacks "Chips" saludables (Tabla 1) considerando las propiedades de cada uno de los ingredientes, modificando únicamente el contenido de maltodextrina (10%, 20% y 35%) y con base en la metodología propuesta por Arias Ramos & Villalta-Vejar. De las tres formulaciones diseñadas y elaboradas, la formulación con el 10% de maltodextrina fue la que tuvo las mejores características físicas de apariencia y textura.

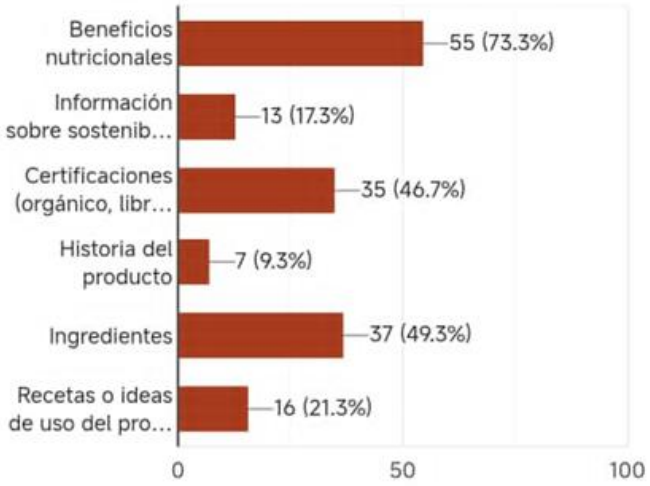

Figura 2. Ítem del instrumento para el estudio de mercado del snack saludable.

En la Figura 3 se muestran los resultados de la prueba de perfil sensorial, en esta prueba fueron analizados cuatro atributos (color, olor, sabor y consistencia o textura). Los resultados mostraron un perfil equilibrado, sobresaliendo el atributo de color cabe mencionar que la flor de Jamaica por su contenido de antocianinas proporciona un color rojo intenso al producto lo cual resulta muy atractivo para el consumidor (Jueces evaluadores).

A partir de los cálculos realizados con base en el Sistema Mexicano de Alimentos Equivalentes y la NOM-051-SCFI/SSA1-2010 modificada en 2020 fue diseñada la etiqueta frontal con el logotipo del producto que por su formulación no incluye contiene Sellos Precautorios y la etiqueta dorsal con el contenido nutrimental, ingredientes, así como quien lo elabora y código QR para conocer más acerca del producto (Figura 4 y Figura 5). El empaque propuesto es un cilindro de cartón de 5cm de diámetro por 20 cm de largo con tapa de aluminio y la presentación del producto es de 60 g. Posteriormente se realizó un análisis de costo considerando la materia prima, costos de producción, amortización y puesta en punto de venta al consumidor dando un total de $19.12 MXN y precio de venta al público de $24.86 MXN considerando un 30% de utilidad neta.

Tabla 1. Formulación snack saludables (Chips).

Ingredientes	Cantidades
Camote	1000 g
Garbanzo	400 g
Jamaica	50 g
Tenebrios	15 g
Agua	3000 mL
Chipotle	200 g
Maltodextrina	100 g
Sal	2 g

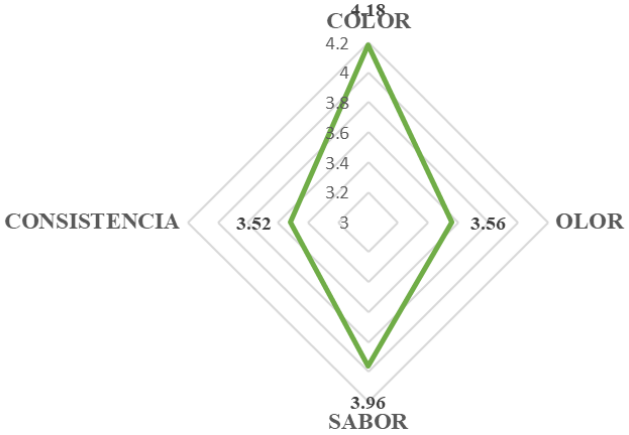

Figura 3. Gráfica de perfil sensorial de snack saludable “TOSTIK MUNCH”.

Figura 4. Etiqueta del empaque para el snack “TOSTIK MUNCH”.

Figura 5. Presentación del producto en INNOVATECNM 2025.

4. Conclusiones

Ante el grave problema del aumento en la incidencia de enfermedades crónico-degenerativas como la obesidad y diabetes entre otras, la búsqueda de alternativas alimenticias saludables y accesibles se ha convertido en una prioridad. El desarrollo de botanas o snacks saludables con alto valor nutrimental utilizando subproductos agrícolas y fuentes de proteína no convencionales, surge como una estrategia innovadora para mejorar la calidad de la dieta y combatir la desnutrición. En México desde tiempos prehispánicos en ciertas regiones, se ha practicado la entomofagia (Consumo de insectos), aunque actualmente sigue existiendo un rechazo muy marcado de su consumo, la aceptación de productos enriquecidos con insectos comestibles se ha incrementado, respaldada por el perfil nutricional, sostenibilidad ambiental y viabilidad económica, lo que los posiciona como una alternativa prometedora para el desarrollo de alimentos con características funcionales que contribuyan a la lucha contra las enfermedades asociadas al consumo de alimentos “Chatarra”.

Agradecimientos

Este trabajo es parte de proyectos de investigación del cuerpo académico ITROQ-CA 11 “Innovación en Bioprocesos Sustentables” del Tecnológico Nacional de México/IT Roque. Agradecemos al Dr. Christian O. Díaz Ovalle por su apoyo para la realización de este proyecto.

Referencias

Djouadi, A., Sales, J., Carvalho, M., & Raymundo, A. (2022). Development of healthy protein-rich crackers using *Tenebrio molitor* flour. *Foods*, 11. DOI: 10.3390/foods11050702.

ENSANUT. (2022). Encuesta Nacional de Salud. Disponible en: https://ensanut.insp.mx/encuestas/ensanutcontinua2022/documentos_analiticos.php

Errico, S., Spagnoletta, A., Verardi, A., Moliterni, S., Dimatteo, S., et al. (2021). *Tenebrio molitor* as a source of interesting natural compounds, their recovery processes, biological effects, and safety aspects. *Comprehensive reviews in food science and food safety*. DOI: 10.1111/1541-4337.12863.

Euan-Pech, E., Chel-Guerrero, L., Rodríguez-Canto, W., Gallegos-Tintoré, S., & Betancur-Ancona, D. (2024). Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) and maize (*Zea mays* L.) flour mixtures for the development of healthy snacks. International *Journal of Gastronomy and Food Science*. 37, 100985. DOI: 10.1016/j.ijgfs.2024.100985.

Gaona-Pineda, E.B., Rodríguez-Ramírez, S., Medina-Zacarías, M. C., Valenzuela-Bravo, D. G., Martinez-Tapia, B., et al. (2023). Consumidores de grupos de alimentos en población mexicana. Ensanut Continua 2020-2022. Salud Pública de México, 65, s248-s258. DOI: 10.21149/14785.

GOB. (2025). Boletín 100. Convoca titular de la SEP a docentes a informar y concientizar sobre la prohibición de venta de comida chatarra en planteles. Disponible en: https://www.gob.mx/sep/prensa/boletin-100-convoca-titular-de-la-sep-a-las-y-los-docentes-a-informar-y-concientizar-sobre-la-prohibicion-de-venta-de-comida-chatarra-en-planteles?idiom=es.

Herdeiro, F., Carvalho, M., Nunes, M., & Raymundo, A. (2024). Development of healthy snacks incorporating meal from *Tenebrio molitor* and *Alphitobius diaperinus* using 3D printing technology. *Foods*, 13.

DOI: 10.3390/foods13020179.

IMPI. (2025). Búsqueda de marca. Disponible en: https://eservicios.impi.gob.mx/seimpi/.

Jabeur, I., Pereira, E., Barros, L., Calhelha, R., Soković, M., et. al. (2017). *Hibiscus sabdariffa* L. as a source of nutrients, bioactive compounds and colouring agents. *Food research international*, 100 Pt 1, 717-723.
DOI: 10.1016/j.foodres.2017.07.073.

Jiang, H., Wang, F.R., Yang, T., Liu, C., Shen, W., et al. (2024). Advances in valorization of sweet potato peels: A comprehensive review on the nutritional compositions, phytochemical profiles, nutraceutical properties, and potential industrial applications. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 23 4, e13400.
DOI: 10.1111/1541-4337.13400.

Kotsou, K., Chatzimitakos, T., Athanasiadis, V., Bozinou, E., Athanassiou, C., et al. (2023). Innovative applications of *Tenebrio molitor* larvae in food product development: A comprehensive review. *Foods*, 12.
DOI: 10.3390/foods12234223.

Kumar, N., Hong, S., Zhu, Y., Garay, A., Yang, J., et. al. (2025). Comprehensive review of chickpea (*Cicer arietinum*): Nutritional significance, health benefits, techno-functionalities, and food applications. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 24 2, e70152.
DOI: 10.1111/1541-4337.70152.

López-Cardoso, F., Leyva-López, N., Gutiérrez-Grijalva, E.P., de la Rocha, R. V., Cabanillas-Bojórquez, L. A., et al. (2025). Mixture design and Kano model for a functional chickpea and hibiscus beverage.*Beverages*, *11*(4). 112.
DOI: 10.3390/beverages11040112.

Melgoza-Villagómez, C.M., Gutierres-Pérez, E., Avaloscastro, R., Fierros-Leyva, G.A., Ortega-Murrieta, P.F., et al. (2022). Tiempo de cocción de nuevas variedades de garbanzo mexicano. In Simposio Nacional De Garbanzo, 67-71.

On-Nom, N., Promdang, P., Inthachat, W., Kanoongon, P., Sahasakul, Y., et. al. (2023). *Wolffia globosa*-based nutritious snack formulation with high protein and dietary fiber contents. *Foods*, 12, 2467.
DOI: 10.3390/foods12142647.

Pedrero, D.L., Pangborn, R.M. (1989). Evaluación sensorial de los alimentos: métodos analíticos. México: Alhambra Mexicana, 1989. p. 251.

Pérez, L.A.B. & Palacios, G.B. (2022). Sistema Mexicano de Alimentos Equivalentes. Ed. Fomento de Nutrición y Salud, A.C. 5ta. Edición.

Rosell, D.M., Quizhpe, J., Ayuso, P., Peñalver, R., & Nieto, G. (2024). Proximate composition, health benefits, and food applications in bakery products of purple-fleshed sweet potato (*Ipomoea batatas* l.) and its by-products: A comprehensive review. *Antioxidants*, 13, 954.
DOI: 10.3390/antiox13080954.

Villalobos-Vega, M., Rodríguez-Rodríguez, G., Armijo-Montes, O., Jiménez-Bonilla, P., & Álvarez-Valverde, V. (2023). Optimization of the extraction of antioxidant compounds from roselle hibiscus calyxes (*Hibiscus sabdariffa*), as a source of nutraceutical beverages. *Molecules*, 28, 2628.
DOI: 10.3390/molecules28062628.

Revista de
Ingeniería en Industrias Alimentarias

ARTÍCULO TECNOLÓGICO

DISEÑO TEÓRICO DE UNA PLANTA ALIMENTARIA PARA LA PRODUCCIÓN DE JARABE DE AGAVE SABOR ARÁNDANO

Omar Isai Cruz León[1], Cristian Cerritos Rodriguez[1], Erika Ramos Ojeda[1] y Laura Isabel Pérez García[2]*

Resumen

El jarabe de agave es producido por hidrólisis de los fructanos almacenados en la planta de maguey. Este endulzante se ha popularizado por su capacidad probiótica e índice glucémico bajo respecto a otros jarabes y mieles naturales; el sabor proveniente del arándano contiene propiedades antioxidantes. Por lo que, el diseño de una planta productora requiere de distintos factores indispensables para su diseño como son los servicios necesarios para que la empresa funcione adecuadamente, aspectos geográficos, económicos, normativos y sobre todo aquellos relacionados con inocuidad alimentaria. Se desarrolló un diagrama conceptual con las operaciones unitarias implicadas en el proceso, además de la aplicación de diferentes métodos para la correcta ubicación de la planta, distribución de proveedores y distribución de los equipos. De acuerdo con los resultados obtenidos, el lugar idóneo para la ubicación de la planta es Guadalajara, Jalisco.

Palabras clave:

Diseño, Hidrolisis, Planta, Proceso.

Abstract

Agave syrup is produced by the hydrolysis of fructans stored in the maguey plant. This sweetener has become popular due to its probiotic capacity and low glycemic index compared to other natural syrups and honeys. The blueberry flavor contains antioxidant properties. Therefore, the design of a production plant requires consideration of various essential factors, such as the services necessary for the company to function properly, geographical, economic, and regulatory aspects, and above all, those related to food safety. A conceptual diagram was developed to identify all the unit operations involved in the process, as well as the application of different methods for the correct plant location, supplier distribution, and equipment allocation. According to the results obtained, the ideal location for the plant is Guadalajara, Jalisco.

Keywords:

Design, Hydrolysis, Plant, Process

[1]Departamento de Ingenierías Tecnológico Nacional de México/I. T. de Roque, Km 8 carretera Celaya-Juventino Rosas, Celaya, Gto.,38110, México.
[2]Departamento de Ciencias Básicas Tecnológico Nacional de México/I. T. de Roque, Km 8 carretera Celaya-Juventino Rosas, Celaya, Gto.,38110, México.

Correo de correspondencia: erika.ro@roque.tecnm.mx

1. Introducción

El diseño de una planta productora de jarabe de agave con estándares de calidad es una alternativa ideal para quienes buscan opciones más saludables y naturales para endulzar sus alimentos y bebidas libres de aditivos artificiales. El jarabe de agave es producido por hidrólisis de los fructanos almacenados en la planta de maguey, el cuál estimula el crecimiento de la flora intestinal (probiótico) y ayuda a personas con gastritis, estreñimiento, diabetes o alguna enfermedad degenerativa (Urbina et al., 2024). Los arándanos son pequeñas bayas azules que pertenecen al grupo de frutas conocido como frutos del bosque, presentan un color típicamente azul oscuro y un aroma característico de la fruta, dulce y agradable, y son una excelente alternativa como edulcorante de origen natural y orgánico (Palma et al., 1998). La producción mundial de arándano presentó una variación promedio anual de +0.9% durante 2011-2020, aunque en 2020 tuvo un incremento de 1.0% con respecto a 2019, según FAOSTAT, al pasar de 1,248,899,577 a 1,261,491,785 t, siendo México el 6° mayor productor con 50,293 t, por lo tanto, lo convierte en una materia prima de excelente aprovechamiento como edulcorante natural (Álvarez et al., 2020). Actualmente, la industria de alimentos requiere el diseño de plantas industriales en donde se tenga un procesamiento de esta materia prima para reutilizar los subproductos para generar un nuevo producto en el mercado.

2. Metodología

La elaboración del diagrama conceptual fue el punto inicial del proyecto (Figura 1), el cual consideró siete equipos: horno, molino, filtro-prensa, evaporador, mezclador, y envasadora. Asimismo, los servicios industriales fueron definidos y obtenidos bajo los balances de materia y energía. El consumo energético fue: horno (4.2 kW/h), molino (2.8 kW/h), prensa (1.3 kW/h), evaporador (13.5 kW/h) y envasadora (0.6 kW/h). La importancia de la ubicación de la planta es primordial para disminuir costos y tiempo de distribución del producto, así mismo se deben considerar costos de transporte y algunos factores subjetivos como el nivel económico de la región, inseguridad, mano de obra, clima, etc., se determinó a través del método de Brown-Gibson. En este caso, el sistema consideró las ciudades de Guadalajara, Morelia y Colima. Los parámetros subjetivos provienen de datos aproximados sobre la la percepción, calificación de la ciudad de 0-100%, aplicado a nivel educativo, corrupción, conflictos laborales, economía social y seguridad para las ciudades fueron: Guadalajara (85, 30, 90, 70 y 40), Morelia (70, 35, 75, 55 y 30) y Colima (74, 30, 50, 60 y 28). Adicionalmente, la ubicación de la planta involucró un conjunto de 11 posibles puntos de provisión de materia prima en la zona contenida entre las tres ciudades.

Asimismo, los proveedores quienes garantizan la materia prima para llevar a cabo la producción fueron seleccionados con el método de los centroides. Posteriormente se realizó la distribución de los equipos dentro de la planta por el método de la huella circular. Los radios de huella circular de los equipos a considerar son (m): trituradora (1), cortadora (3), prensa (2.7), llenadora (1.5), autoclave (1.5) y envasadora (3). El costo propuesto de terreno usado es de 12 $/m^2 y de tubería de interconexión de 234 $/m. Finalmente, el diagrama de tubería e instrumentación (P&ID por sus siglas en inglés) fue realizado siguiendo la propuesta por Díaz-Ovalle (2023). Los modelos matemáticos fueron resueltos con MS Excel.

3.Resultados

La planta tiene una producción de aproximadamente 2.5 t/día de jarabe procesado y envasado en botellas de 500 mL. El análisis realizado de costos de operación por día indicó un costo de energía eléctrica de $24,315.94. El costo total de la planta fue de $127,648,551.26, el cual incluyó los equipos, el terreno, los servicios, mano de obra, etc.

La Figura 2 muestra la mejor ubicación de la planta, bajo las consideraciones subjetivas el resultando como mejor opción es la ciudad de Guadalajara, Jalisco. Una vez definida la ubicación de la planta se realiza la distribución de los equipos de está, considerando el tamaño y características del terreno, empleando el método de la huella circular, en el cual se evaluaron las dimensiones de los equipos para determinar la mejor distribución, disminuyendo riesgo y optimizando espacios, como se muestra en la Figura 3.

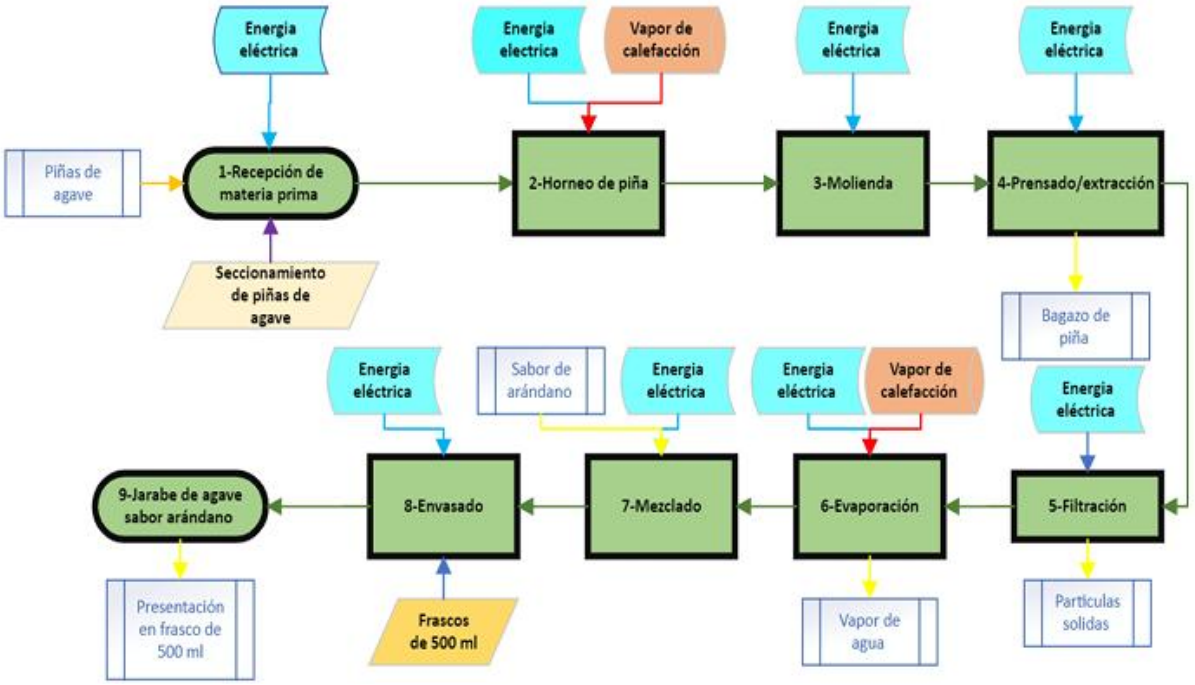

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso.

De acuerdo con la Figura 2, se observa la mejor ubicación de la planta, resultando como mejor opción la ciudad de Guadalajara, Jalisco, en donde se consideraron factores subjetivos para una ubicación óptima.

Una vez definida la ubicación de la planta se realiza la distribución de los equipos de está, considerando el tamaño y características del terreno, empleando el método de la huella circular, en el cual se evaluaron las dimensiones de los equipos para determinar la mejor distribución, disminuyendo riesgo y optimizando espacios, como se muestra en la Figura 3. El área para instalación óptima fueron 72.3 m^2 con una interconexión de 105 m con un valor mínimo de 385,612 $ MXN.

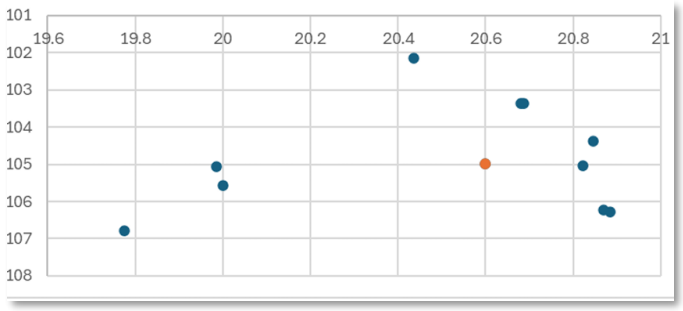

Figura 2. Localización de la planta bajo distancias en km.

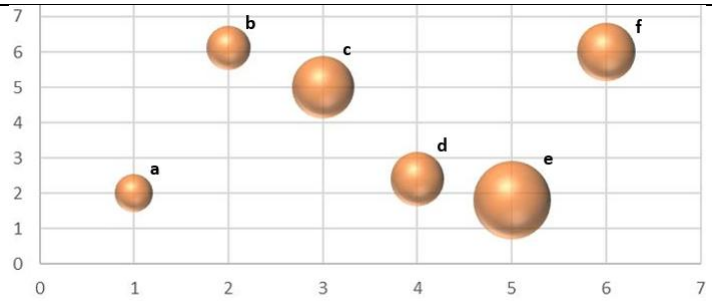

Figura 3. Ubicación de equipos en planta bajo coordenadas en distancia de m.

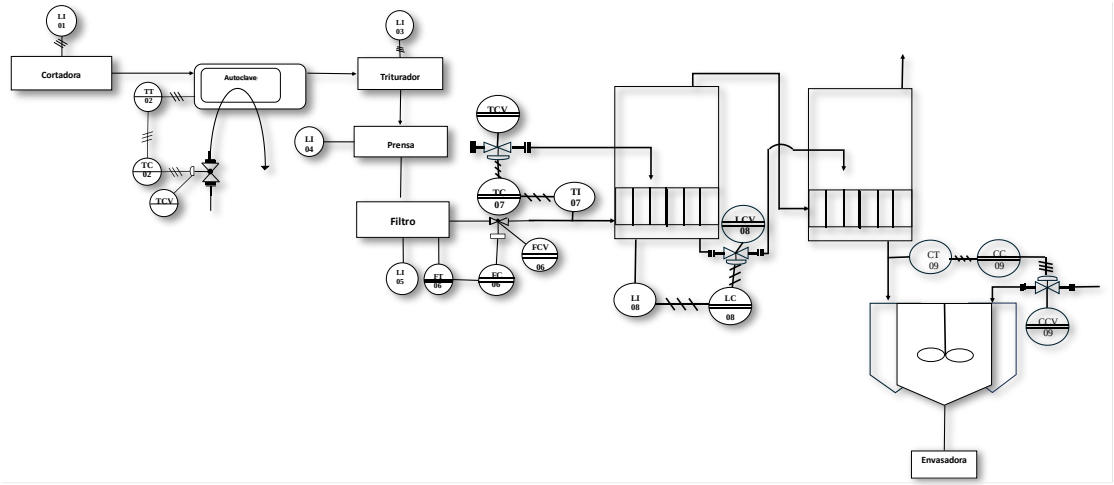

Figura 4 Diagrama P&ID

En la Figura 4 se tiene el diagrama de instrumentación y tubería (P&ID) el cual muestra los sistemas de instrumentación y control de las líneas de procesos, sin embargo, no incluye condiciones de operación, flujos, posiciones y rutas de las tuberías, con el cual se asegura un control del proceso.

4. Conclusiones

Tomando de referencia los resultados obtenidos por los diferentes métodos aplicados, la ubicación idónea de la empresa fue la ciudad de Guadalajara, ya que es primordial para asegurar el éxito de la planta en el mercado. Los factores subjetivos considerados fueron educación, corrupción y desarrollo económico. Además, la ubicación planteada demuestra ser una de las ubicaciones con menor impacto en cuanto a costos de transporte por parte de proveedores y distribución. Proyectando la planta a una expansión o nuevas ubicaciones, ya que actualmente se busca la elaboración de productos saludables. De acuerdo con el análisis de costos, se determinó recuperar la inversión aproximadamente en 7 años, por lo que se considera una empresa rentable ya que la depreciación de equipos no es de un impacto mayor.

Referencias

Álvarez-Ríos, G.D., Pacheco-Torres, F., Figueredo-Urbina, C.J., & Casas, A. (2020). Management, morphological and genetic diversity of domesticated agaves in Michoacán, México. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 16(1), 1-17. DOI: 10.1186/S13002-020-0353 9/FIGURES/6

Díaz-Ovalle, C.O. (2023). Diseño de plantas alimentarias. Celaya, Gto. TecNM/I.T. de Roque.

Palma Álvarez, A., Cassiano, G., & Villa Kamel, A. (1998). La explotación del maguey en zona de Metztitlán. Dimensión Antropológica.

Urbina, C.J.F., Cervantes, O.A., & Ovando, A.C. (2024). Agaves utilizados en la extracción de savia para la producción de jarabe. Polibotánica, 58. DOI:10.18387/polibotanica.58.19.

ARTÍCULO CIENTÍFICO

EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE FRIJOL DE RIEGO Y TEMPORAL EN GUANAJUATO: UNA ALTERNATIVA DE VALORIZACIÓN

José Ramón Castellanos-Castro[1], José Enrique Botello-Álvarez[1], Alfredo Josué Gámez-Vázquez[2], Roberto Carlos Salmorán-Salgado[1], María Teresa Maldonado-Mancera[1]*

Resumen

El frijol es un cultivo básico en la dieta mexicana y una fuente importante de ingresos para pequeños productores. En Guanajuato, su producción enfrenta retos crecientes por el cambio climático, altos costos y bajos rendimientos. Este estudio implementó la metodología de análisis de ciclo de vida para comparar los impactos ambientales de la producción de frijol bajo riego y temporal, así como un módulo de procesamiento. El sistema de riego mostró mayores rendimientos (1.91 vs 0.39 t/ha), pero también mayores impactos en cambio climático (2.15 vs 2.05 kg CO_2 eq) y agotamiento de agua (1.75 vs 0.0 m³). El cultivo de temporal presentó mayor ocupación de tierras agrícolas (17.87 vs 4.21 m²a). La etapa de deshidratación fue la más intensiva (hasta 81 % del impacto). Se identifican oportunidades de mitigación diferenciadas para cada sistema, orientadas a una producción y valorización sustentable.

Palabras clave:

Impacto ambiental, cambio climático, uso de suelo agrícola, análisis de ciclo de vida.

Abstract

Beans are a staple crop in the Mexican diet and an important source of income for small-scale farmers. In Guanajuato, bean production faces growing challenges due to climate change, high production costs, and low yields. This study applied the life cycle assessment (LCA) methodology to compare the environmental impacts of bean production under irrigated and rainfed systems, including a processing stage. The irrigated system showed higher yields (1.91 vs 0.39 t/ha), but also greater impacts in terms of climate change (2.15 vs 2.05 kg CO_2 eq) and water depletion (1.75 vs 0.0 m³). The rainfed system had greater agricultural land occupation (17.87 vs 4.21 m²a). The dehydration stage was the most intensive (up to 81% of total impact). Distinct mitigation opportunities were identified for each system, aiming toward more sustainable production and valorization.

Keywords:

Environmental impact, climate change, agricultural land use, life cycle assessment.

[1]Departamento de Ingeniería Bioquímica y ambiental, Instituto Tecnológico de Celaya, Tecnológico Nacional de México, Av. Tecnológico y Av. García Cubas S/N, Celaya, Guanajuato, 38010, México.
[2]Departamento de Producción y Tecnología de Semillas de Cebada, Campo Experimental Bajío-INIFAP. Carretera Celaya-San Miguel Allende Celaya km 6.5, Guanajuato. 38110, México.
*Autor de correspondencia: maritere22190@icloud.com

1. Introducción

México cuenta con una superficie total de 196,437,500 ha, de las cuales, en el año 2023, se destinaron 20,023,594 ha (equivalente al 10.19%) a actividades agrícolas. Los productos que generaron una mayor derrama económica fueron el maíz, con 172,353 millones de pesos; el aguacate, con 60,097 millones de pesos; y la caña de azúcar, con 52,936 millones de pesos. En cuanto a los principales cultivos sembrados, el maíz ocupó 6,941,031 ha, seguido del sorgo con 1,359,920 ha y el frijol con 1,091,125 ha (SIAP, 2023). El frijol es una de las legumbres más consumidas en México con un consumo per cápita anual de 11 kg; es parte esencial de la dieta tradicional desde tiempos prehispánicos, junto al maíz y el chile. Su alto valor nutricional, bajo costo, versatilidad culinaria y adaptabilidad a diversas regiones lo convierten en un alimento básico y accesible, además de ser un símbolo cultural profundamente arraigado.

Los principales estados productores de frijol fueron Zacatecas con 314,987 ha, Durango con 153,014 ha y Chiapas con 112,563 ha. Sin embargo, los estados que obtuvieron la mayor derrama económica por la producción de frijol fueron Sinaloa, con 3,822 millones de pesos; Zacatecas, con 3,052 millones de pesos; y Nayarit, con 1,450 millones de pesos debido a los altos rendimientos y la gran superficie sembrada. Este cultivo enfrenta un índice de siniestralidad elevado del 30.23% (SIAP, 2023), provocado principalmente por el cambio climático generando lluvias irregulares y temperaturas extremas. El cultivo de frijol en modalidad de temporal es el más afectado ocasionando que año tras año, la superficie sembrada disminuya drásticamente. Los estados más afectados por estas condiciones fueron Durango, San Luis Potosí y Querétaro.

Los costos de producción para una hectárea de frijol en modalidad de riego ascienden aproximadamente a 30,000 pesos. En el año 2023, según reportes del FIRA, el precio estimado por tonelada era de 17,500 pesos, lo que implica que el punto de equilibrio se alcanza con un rendimiento mínimo de 1.72 t/ha. Rendimientos inferiores resultan en pérdidas económicas. En cuanto a la rentabilidad del cultivo de frijol en modalidad de temporal, generalmente se registran pérdidas debido a los bajos rendimientos obtenidos. Por esta razón, los agricultores que optan por esta modalidad suelen cultivarlo principalmente para autoconsumo.

En el año 2023, Guanajuato ocupó el sexto lugar a nivel nacional en superficie sembrada de frijol y en derrama económica, con 58,664 ha y un valor de 696 millones de pesos, presentando un porcentaje de siniestralidad del 16.8%. En modalidad de temporal, se sembraron 50,311 ha (85.76%) con un rendimiento promedio de 0.56 t/ha, lo que generó una derrama económica de 368 millones de pesos (52.87%). En modalidad de riego, se cultivaron 8,353 ha (14.24%) con un rendimiento de 2.38 t/ha y un valor económico de 328 millones de pesos (47.13%). El cultivo de frijol en Guanajuato ha sufrido una significativa disminución en su superficie sembrada desde el año 2000, con una reducción de 4,015 ha (32.46%) en modalidad de riego y 57,914 ha (53.51%) en temporal (SIAP, 2023). Este descenso se atribuye a factores como el cambio climático, que afecta los rendimientos, los altos costos de producción, la competencia con cultivos más rentables como las hortalizas, la reducción de apoyos gubernamentales y cambios en la demanda del mercado. Además, el envejecimiento de los agricultores y la falta de relevo generacional han agravado esta situación, afectando la producción de frijol en el estado.

El frijol es una fuente importante de nutrientes, compuestos nutracéuticos y antioxidantes esenciales en la alimentación humana. Destaca por su alto contenido de carbohidratos, proteínas y fibra. Entre los minerales más abundantes en el frijol se encuentran potasio, hierro, magnesio y calcio. El contenido de proteína varía entre el 20 y el 30 % según la variedad de *Phaseolus* (Paredes et al., 2009). En cuanto a los carbohidratos, estos representan entre el 55 y el 65 %, conformados principalmente por polisacáridos derivados del almidón y fibra dietética, además de una menor proporción de mono- y oligosacáridos (Reynoso-Camacho et al., 2006). Se ha asociado el consumo regular de frijol con una disminución del riesgo de desarrollar enfermedades crónicas y cardiovasculares, como cáncer, diabetes y obesidad. Además, se ha observado que su ingesta contribuye a mejorar el índice glucémico y a reducir los niveles de colesterol y triglicéridos en sangre (Suárez-Martínez et al., 2016).

En este trabajo se presenta un análisis del impacto ambiental de la producción agrícola convencional de frijol de riego y de temporal en Guanajuato y finalmente se presenta la elaboración de harinas de frijol cocido como una alternativa para aumentar y facilitar su consumo.

2. Metodología

2.1. Análisis de impacto ambiental

En este estudio se consideró la producción de frijol bajo riego en los meses de febrero -mayo y temporal junio – septiembre en el Estado de Guanajuato. Los datos del paquete tecnológico de ambos cultivos que incluyen insumos y labores agrícolas fueron proporcionados por el

Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias Unidad Bajío ubicada en Celaya, Guanajuato. El Análisis de Ciclo de Vida ACV se realizó bajo las normas ISO 14040 (ISO, 2006a) y 14044 (ISO, 2006b). El proceso comprendió 4 etapas: la definición de objetivos y alcance de ACV, los inventarios de insumos y emisiones, la evaluación de los impactos ambientales y la interpretación de los resultados. Se plantea como objetivo evaluar el impacto de la producción agrícola de frijol bajo riego y temporal. El análisis se considera "de la cuna a la puerta", es decir, desde la producción de los insumos hasta la cosecha del frijol (Figura 1). Como Unidad Funcional (FU) se consideró un kilogramo de frijol.

En el inventario de insumos se consideró la semilla, fertilizantes, herbicidas, plaguicidas, el consumo de diésel en las labores agrícolas y el uso de energía eléctrica en el caso de riego. Las cargas ambientales de los insumos (Backgroud) se evaluaron de la base datos Ecoinvent v3.9. Las emisiones hacia el aire, el agua y suelo durante el cultivo de frijol (Foreground) fueron evaluados por las siguientes metodologías. Para los compuestos nitrogenados provenientes de la fertilización se usó las metodologías de manual del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2019). Las emisiones asociadas al consumo de diésel en maquinaria agrícola fueron evaluadas por la metodología del Software: Gases de Efecto Invernadero, Regulación de Emisiones y Uso de Energía en Tecnologías (GREET, 2023). Las emisiones de pesticidas al agua, aire y suelo se estimaron utilizando el software SimaPro®. Las emisiones de fosfatos a los cuerpos de agua se calcularon con los supuestos de Parajulli et al (2017).

Para la determinación de los indicadores de impacto ambiental en los rubros de daño a la salud humana, daño a los ecosistemas y agotamiento de recursos, se utilizó el software SimaPro® v9.5, que emplea la metodología ReCiPe 2016 v1.1, con enfoques jerárquicos en indicadores de punto medio (Midpoint) y punto final (Huijbregts et al., 2017).

2.2. Harina de frijol cocido

Se utilizó frijol (*Phaseolus vulgaris*) variedad flor de junio, obtenido de un mercado local. Un kilogramo de frijol fue limpiado manualmente de impurezas y lavado a chorro de agua, (3 L/kg). Se adicionaron 13 g de NaCl. Los frijoles fueron cocidos en una olla de presión, agregando 4.5 L agua por kilogramo de frijol. Se cuantificó la cantidad de gas LP consumido en una estufa doméstica. Los frijoles cocidos fríos fueron molidos en una licuadora sin agua adicional. La pasta fue extendida sobre 5 bandejas de acero inoxidable de 70cmx50 cm recubiertas con papel encerado para evitar adherencia. Los frijoles fueron deshidratados en un secador de bandejas con control automático de temperatura con aire calentado con resistencias eléctricas e impulsado con ventiladores axiales. La temperatura en la cámara de secado fue de 75°C, el tiempo total de operación del secador fue de 10h. Los frijoles secos fueron molidos en un procesador de alimentos. Se realizaron pruebas de hidratación. Se realizó un análisis de impacto ambiental al proceso.

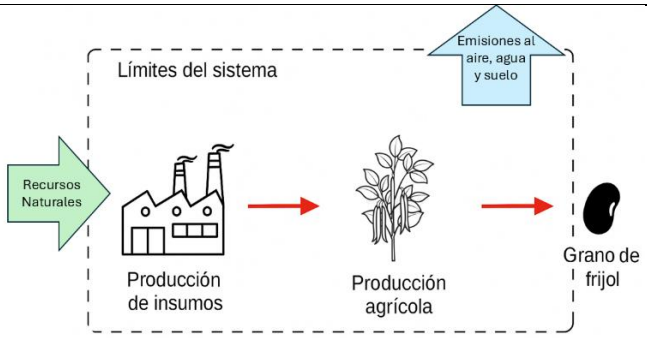

Figura 1. Definición de fronteras y sistema para el Análisis de Ciclo de Vida del frijol.

3. Resultados

3.1. Insumos y producción de frijol en riego y temporal

En la Figura 2 se presenta producción y la superficie sembrada de frijol en el Estado de Guanajuato 2000-2023. La producción de frijol de temporal desde el año 2000 representa cerca del 60% del total del Estado. En diferentes años, se ha presentado una severa disminución en la producción de frijol de temporal, asociado a siniestralidad por bajas precipitaciones. Se puede observar que existe una disminución gradual y constante de la superficie sembrada de frijol de temporal,

aproximadamente 2,800 ha/año. En el caso de frijol de riego se observa que la superficie y la producción se han mantenido con poca variación. En este periodo la productividad promedio es de 0.39 y 1.91 t/ha para temporal y riego respectivamente.

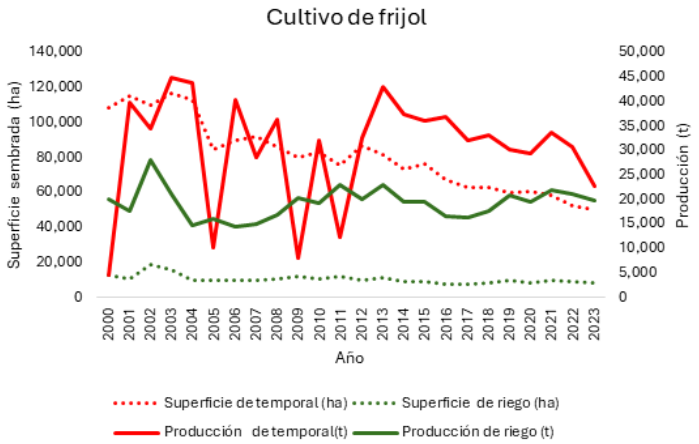

Figura 2. Producción y superficie sembrada de frijol en Estado de Guanajuato (SIAP, 2023).

En la Tabla 1 se presentan los insumos agrícolas y los rendimientos de la producción de frijol en las modalidades de riego y temporal proporcionados por el Instituto Nacional de Investigación Forestal Agrícola y Pecuaria Unidad Bajío (INIFAP-Bajío). En el caso de fertilizantes se consideraron urea, difosfato de amonio y cloruro de potasio, como fuentes de nitrógeno, fósforo y potasio respectivamente. En riego se consideró el uso de agua de pozo extraída y distribuida por bombas con motor eléctrico. La diferencia más relevante entre las modalidades de cultivo es la densidad de siembra, que en el caso de riego demanda altas cantidades de agua y fertilizantes. En general, en Guanajuato la agricultura de riego para la producción de granos básicos es intensiva buscando su rentabilidad a través de altos rendimientos y bajo riesgo de siniestralidad. En el cultivo de temporal se busca reducir la inversión en insumos por el alto riesgo de siniestralidad.

Tabla 1. Insumos y rendimiento de frijol en las modalidades de riego y temporal.

Modalidad de cultivo	Riego	Temporal
Rendimiento (t/ha)	2.380	0.56
Labranza mecanizada (L Diésel/ha)	109	99
Semilla (Unidades/ha)	110,000	55,000
Fertilizante (kg/ha)	303	183.36
Nitrógeno (kg N/ha)	80	60
Fosforo (kg P_2O_5/ha)	60	40
Potasio (kg K_2O/ha)	30	0
Herbicidas (kg IA/ha)	2.483	2.48
Pesticidas (kg IA/ha)	0.190	0.19
Agua (m^3/ha)	4,500	0
Energía eléctrica (kWh/ha)	5,864	0

ha: ha, IA: ingrediente activo.

3.2. Impactos ambientales

Los resultados de las emisiones estimadas hacia el agua, suelo y aire en los módulos agrícolas por unidad funcional para las modalidades de riego y temporal se muestran en la Tabla 2. La evaluación de las emisiones con la metodología ReCiPe en conjunto con las aportaciones Backround para la fabricación de los insumos, revelaron diferencias significativas entre ambas modalidades de cultivo en las 18 categorías de impacto Midpoint.

Al comparar los impactos totales del sistema de producción de frijol bajo riego y temporal (Tabla 3), se observa que el frijol de riego presenta mayores impactos en la mayoría de las categorías evaluadas, destacando en cambio climático (2.15 vs. 2.05 kg CO_2 eq), radiación ionizante ($7.133x10^{-2}$ vs. $8.69x10^{-3}$ kBq U235 eq) y agotamiento de agua (1.75 m³ en riego, nulo en temporal), lo que refleja la presión hídrica asociada al uso de sistemas de riego. También se registraron valores más altos para el riego en acidificación terrestre, eutrofización (dulce y marina), formación de oxidantes fotoquímicos y material particulado, aunque en menor magnitud relativa. Por el contrario, el frijol de temporal presentó mayores cargas ambientales en las categorías relacionadas con toxicidad y ecotoxicidad: toxicidad humana (0.215 vs. 0.0905 kg 1,4-DB eq), ecotoxicidad terrestre (0.129 vs. 0.0313) y dulce (0.0377 vs. 0.0093), asociadas a prácticas menos controladas por el mayor uso de agroquímicos por hectárea efectiva. Asimismo, al bajo rendimiento del grano que conlleva a mayores relaciones de insumos contra producto, como se observa en la ocupación de suelo agrícola: 17.9 y 4.2 m²a/kg para riego y temporal respectivamente.

Tabla 2. Emisiones del módulo agrícola para la producción de 1 kg de frijol (FU) en modalidad de temporal y riego

Emisión	**Riego**	**Temporal**
Emisiones al aire		
Fertilización y actividades agrícolas:		
N_2O Directo (kg N_2O)	$7.241x10^{-4}$	$2.026x10^{-3}$
N_2O indirecto por volatilización (kg N_2O)	$5.282x10^{-5}$	$1.684x10^{-4}$
N_2O indirecto por lixiviación (kg N_2O)	$1.629x10^{-4}$	$4.557x10^{-4}$
CO_2 por urea [kg CO_2)	0.038	0.126
Amoníaco (kg NH_3)	$1.681x10^{-3}$	$5.357x10^{-3}$
Óxido nítrico (kg NO)	$1.345x10^{-3}$	$4.286x10^{-3}$
Compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (kg NMVOC)	$3.613x10^{-4}$	$1.536x10^{-3}$
Material particulado PM_{10} (kg PM_{10})	$6.555x10^{-4}$	$2.786x10^{-3}$
Material particulado $PM_{2.5}$ (kg $PM_{2.5}$)	$2.521x10^{-5}$	$1.071x10^{-4}$
Plaguicidas (kg ingrediente activo)	$9.570x10^{-5}$	$4.294x10^{-4}$
Uso de combustibles en labranza, aplicación de plaguicidas/agroquímicos:		
Óxido nitroso (kg N_2O)	$1.442x10^{-6}$	$5.519x10^{-6}$
Metano (kg CH_4)	$9.877x10^{-7}$	$3.780x10^{-6}$
Dióxido de carbono (kg CO_2)	0.122	0.467
Monóxido de carbono (kg CO)	$3.137x10^{-4}$	$1.201x10^{-3}$
Óxidos de nitrógeno (kg NO_X)	$6.809x10^{-4}$	$2.606x10^{-3}$
Material particulado PM_{10} (kg PM_{10})	$4.676x10^{-5}$	$1.790x10^{-4}$
Material particulado $PM_{2.5}$ (kg $PM_{2.5}$)	$4.536x10^{-5}$	$1.736x10^{-4}$
Óxidos de azufre (kg SO_x)	$8.504x10^{-7}$	$3.254x10^{-6}$
Compuestos orgánicos volátiles (kg VOC's)	$6.506x10^{-5}$	$2.490x10^{-4}$
Emisiones al agua		
Plaguicidas (kg ingrediente activo)	$9.594x10^{-6}$	$4.766x10^{-5}$
Fosfatos (kg PO_4^{3-})	$1.261x10^{-3}$	$3.571x10^{-3}$
Potasio (kg KO_2)	$4.197x10^{-4}$	-
Emisiones al suelo		
Plaguicidas (kg ingrediente activo)	$1.009x10^{-3}$	$4.294x10^{-3}$

En particular, el agotamiento de recursos fósiles fue considerablemente mayor en el sistema de riego (0.597 vs. 0.379 kg oil eq), lo cual puede atribuirse a la participación dominante de la electricidad en la operación del riego presurizado, además del uso de insumos intensivos en energía como fertilizantes nitrogenados y potásicos. Mientras que en el sistema temporal el consumo de energía fósil se encuentra más relacionado con el uso de maquinaria agrícola y la producción de insumos, en el sistema de riego el requerimiento energético es más constante y directo, debido al bombeo de agua a lo largo del ciclo del cultivo. Esta diferencia refuerza la necesidad de considerar no solo los beneficios de rendimiento asociados al riego, sino también su dependencia de recursos no renovables y la

posibilidad de mitigarlos mediante tecnologías energéticas más limpias o eficientes.

Al comparar la huella de carbono obtenida en este estudio con la reportada por otros autores, se observan diferencias importantes. Por ejemplo, Pérez et al. (2024) estimaron una emisión de 1.20 kg de CO_2 equivalente por kilogramo de frijol seco procesado en cultivos orgánicos de riego en campo abierto en España. En contraste, Tidåker et al. (2021) reportaron valores más bajos tanto para el frijol como para otras legumbres cultivadas en Suecia: 0.44 kg de CO_2 eq./kg de frijol.

Al analizar las contribuciones porcentuales de las distintas fuentes dentro de cada sistema, se observa que en el temporal (Figura 3) la mayor parte del impacto en cambio climático (67.7%), acidificación terrestre (77.8%) y eutrofización (más del 80%) proviene de las emisiones directas del cultivo, especialmente las derivadas del uso de fertilizantes nitrogenados y aplicación de pesticidas, siendo estos últimos los principales responsables del agotamiento de la capa de ozono y la ecotoxicidad. Además, el uso de maquinaria agrícola a base de diésel contribuye significativamente al agotamiento de recursos fósiles y formación de oxidantes fotoquímicos. En contraste, en el sistema de riego (Figura 4), la electricidad para bombeo representa la fuente predominante de impactos en cambio climático (69.7%), formación de oxidantes fotoquímicos (69.2%), radiación ionizante (95.9%) y agotamiento de recursos fósiles (81.6%), destacando la importancia de la matriz energética utilizada.

Tabla 3. Valores absolutos para los indicadores de impacto Midpoint en los módulos agrícolas de riego y temporal por unidad funcional.

Categoría de impacto	**Unidad**	**Riego**	**Temporal**
Cambia climático	kg CO_2 eq	2.149	2.046
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	$4.894x10^{-8}$	$1.05x10^{-7}$
Acidificación terrestre	kg SO_2 eq	$1.083x10^{-2}$	$1.873x10^{-2}$
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	$4.666x10^{-4}$	$1.212x10^{-3}$
Eutrofización marina	kg N eq	$4.330x10^{-4}$	$1.032x10^{-3}$
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	$9.053x10^{-2}$	0.2149
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	$6.352x10^{-3}$	$7.14x10^{-3}$
Formación de material particulado	kg PM_{10} eq	$4.414x10^{-3}$	$7.04x10^{-3}$
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	$3.130x10^{-2}$	0.12913
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DB eq	$9.340x10^{-3}$	$3.768x10^{-2}$
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB eq	$2.559x10^{-3}$	$8.46x10^{-3}$
Radiación ionizante	kBq U_{235} eq	$7.133x10^{-2}$	$8.69x10^{-3}$
Ocupación de tierras agrícolas	m^2a	4.21	17.87
Ocupación de tierras urbanas	m^2a	$2.323x10^{-2}$	$6.38x10^{-2}$
Transformación natural de suelo	m^2	$5.882x10^{-6}$	$1.93x10^{-5}$
Agotamiento de agua	m^3	1.746	0
Agotamiento de metales	kg Fe eq	$1.958x10^{-2}$	$5.66x10^{-2}$
Agotamiento de recursos fósiles	kg oil eq	0.597	0.379

Las emisiones directas del cultivo también son relevantes en categorías como eutrofización y acidificación, mientras que la producción y aplicación de fertilizantes y pesticidas mantienen su rol crítico en toxicidad, ecotoxicidad y agotamiento de metales. En conjunto, estos resultados subrayan la necesidad de equilibrar los beneficios productivos del riego con su elevada dependencia energética y la potencial mitigación mediante fuentes renovables, así como la importancia de optimizar el uso de agroquímicos en sistemas de temporal para reducir sus impactos toxicológicos y de uso del suelo.

Además del análisis del módulo agrícola, se incorporaron dos etapas adicionales en la evaluación ambiental: el cocimiento doméstico del frijol (realizado en olla de presión con gas LP) y la deshidratación para la obtención de harina (mediante horno eléctrico), cuyos inventarios se presentan en la Tabla 4. Los resultados, expresados como puntuación única (Figura 5), evidencian que la etapa de deshidratación es la principal contribuyente al impacto ambiental total en ambos escenarios de cultivo, debido a su elevado consumo energético. En el caso del frijol de riego, la deshidratación representa el 76 % del impacto total, mientras que en el escenario de temporal

alcanza el 81 %. El módulo agrícola aporta el 17 % y 12 % en los sistemas de riego y temporal, respectivamente. Por su parte, el cocimiento tiene una menor contribución relativa, con un 7 % para ambos escenarios. Estos resultados señalan a la deshidratación como la etapa crítica a optimizar dentro del sistema de producción evaluado.

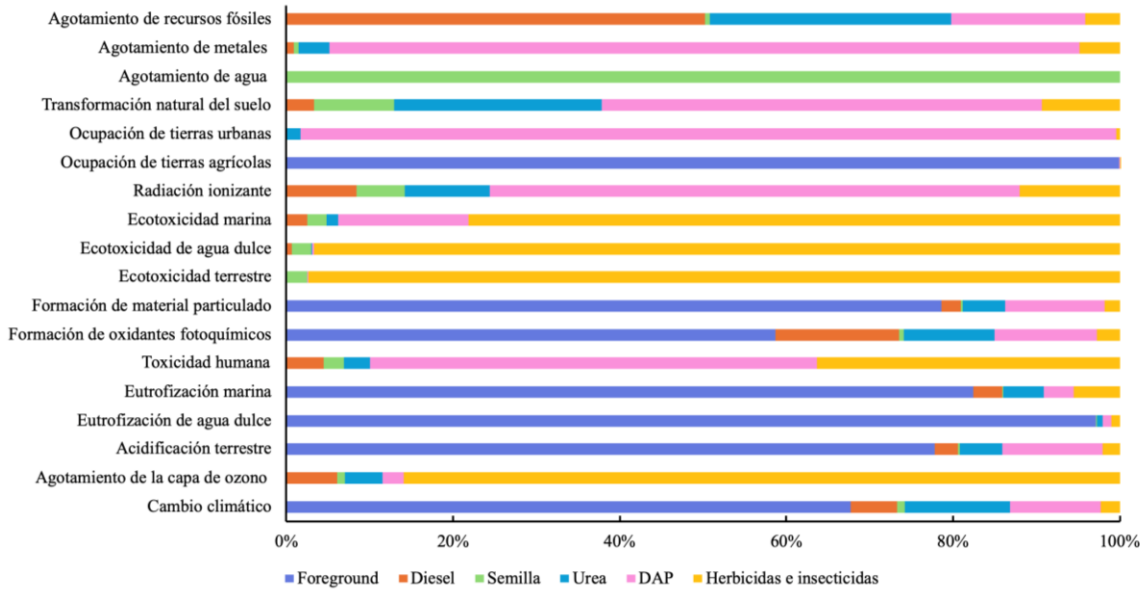

Figura 3. Indicadores de punto de medio de impacto ambiental y porcentajes de contribución de los insumos en la producción de frijol de temporal.

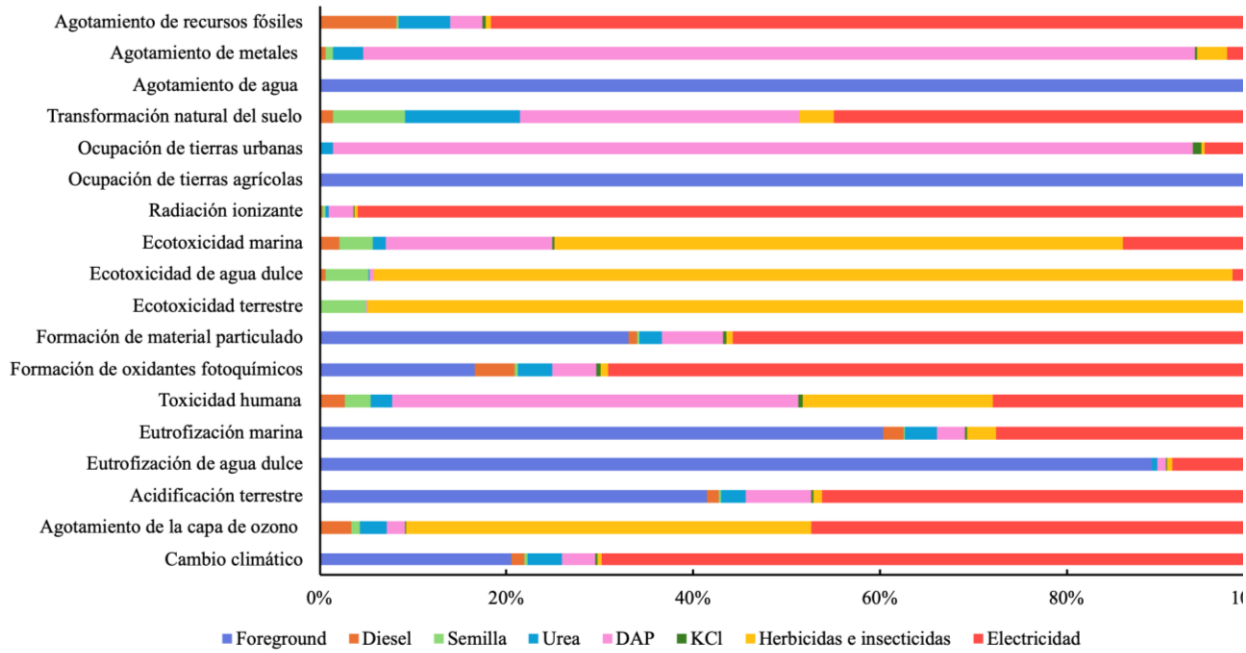

Figura 4. Indicadores de impacto ambiental de punto de medio y porcentajes de contribución de los insumos en la producción de frijol de riego.

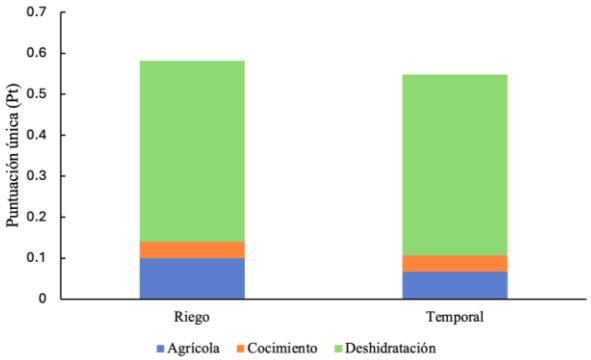

Figura 5. Puntuación única de impacto ambiental de los módulos agrícola, cocimiento y deshidratación de las harinas de frijol.

3.3. Valorización harina de frijol

Por cada kilogramo de frijol sometido a cocimiento y deshidratación se obtienen 4.1 kg de producto cocido y 0.95 kg de harina. En la Tabla 4 se presenta los insumos y gastos energéticos para la producción de frijol cocido y deshidratado. El gasto energético más relevante es la energía eléctrica consumida durante el secado. Tanto el proceso de cocido como el deshidratado contribuyen significativamente al impacto ambiental del frijol Figura 5.

La harina de frijol es también una alternativa de conservación y fácil preparación en los hogares. El valor monetario de la harina de frijol puede incrementarse hasta en un 300% del precio de frijol comercial. En ensayos de rehidratación, a cada 100 g de harina de frijol con 300 mL de agua hirviendo mezclando durante 3 minutos se obtuvieron pastas homogéneas. La pasta de frijol rehidratado tiene una viscosidad aparente de 6550 cP similar a la pasta de frijol cocido.

Tabla 4. Inventaros de Insumo Harina de Frijol

Insumo	**Cantidad**
Frijol (kg)	1.0
Agua de lavado (L)	3.0
Agua de cocimiento (L)	4.5
Sal (NaCl) (g)	13.0
Gas LP (kg)	0.18±0.025
Energía eléctrica (kWh)	12.68±0.390
Rendimientos	
Frijol cocido (kg)	4.087±0.150
Harina de frijol (kg)	0.950±0.056

4. Conclusiones

El análisis de ciclo de vida comparativo entre las modalidades de cultivo de frijol bajo riego y temporal en Guanajuato evidenció diferencias significativas tanto en productividad como en impactos ambientales. El sistema de riego presentó rendimientos considerablemente mayores (1.91 t/ha frente a 0.39 t/ha), pero también implicó un uso intensivo de agua, fertilizantes y energía eléctrica, lo que resultó en mayores impactos en categorías como cambio climático o huella de carbono (2.15 vs 2.05 kg CO_2 eq), agotamiento de agua (1.75 vs 0.0 m³) y uso de recursos fósiles, con una huella ambiental más elevada por unidad de producto. En contraste, el cultivo de temporal, aunque con menores insumos, mostró mayores impactos en categorías relacionadas con toxicidad y ecotoxicidad, debido al bajo rendimiento y a un manejo menos controlado de agroquímicos.

Un aspecto crítico identificado fue la ocupación de tierras agrícolas, cuyo impacto fue significativamente mayor en el cultivo de temporal (17.87 vs 4.21 m²a). Este resultado está directamente relacionado con la baja productividad del sistema de temporal, ya que se requiere una mayor superficie para obtener la misma cantidad de frijol en comparación con el sistema de riego. Esta presión sobre el uso del suelo no solo representa un desafío ambiental, sino también limita el potencial de intensificación sostenible en regiones donde la tierra cultivable es un recurso escaso o en competencia con otros usos. Por ello, mejorar los rendimientos del cultivo de temporal, a través de mejores prácticas agronómicas o tecnologías adaptadas, podría ser clave para reducir su impacto por

unidad de producto, particularmente en lo referente a la ocupación de tierras agrícolas.

Al ampliar el análisis hacia las etapas de procesamiento, se identificó que la deshidratación del frijol mediante horno eléctrico representa la fase más crítica en términos ambientales, con contribuciones de hasta el 81 % del impacto total del sistema, superando con amplio margen a los módulos agrícola y de cocimiento. Esta etapa, determinada principalmente por el consumo energético, requiere atención prioritaria para la optimización del proceso si se desea avanzar hacia sistemas de transformación más sostenibles. Por su parte, el cocimiento doméstico, realizado con gas LP, mostró una contribución moderada al impacto global, inferior al 8 % en ambos escenarios.

Finalmente, se destaca que la producción de harina de frijol, aunque ambientalmente intensiva por el proceso de secado, constituye una estrategia de valor agregado con beneficios en conservación y preparación rápida. Esto, junto con su buena reconstitución en ensayos de rehidratación, refuerza su potencial como alternativa alimentaria viable. En conjunto, los resultados subrayan la necesidad de implementar medidas diferenciadas para cada sistema: eficiencia energética y uso de energías limpias en el riego, y optimización del uso de insumos en el temporal, así como mejoras tecnológicas en la etapa de deshidratación para reducir el impacto ambiental del producto final.

Referencias

FIRA (Fideicomisos Institucionales de Relación con la Agricultura). (2023). Fideicomisos institucionales en relación con la agricultura. https://www.fira.gob.mx/Nd/index.jsp

GREET (The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation). (2023). Model (v. 13239). Argonne National Laboratory. https://greet.es.anl.gov/

Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., et. al. (2017). ReCiPe 2016 v1.1: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level – Report I: Characterization. Netherlands: RIVM. https://www.rivm.nl/en.

INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). (2017). Agenda técnica agrícola de Guanajuato. Gobierno de México.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2019). Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. IPCC. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/.

ISO (International Organization for Standardization). (2006a). ISO 14040:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework. https://www.iso.org/standard/37456.html.

ISO (International Organization for Standardization). (2006b). ISO 14044:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines. https://www.iso.org/standard/38498.html.

Paredes, M., Becerra, V., & Tay, J. (2009). Inorganic nutritional composition of common bean (Phaseolus vulgaris L.) genotypes race Chile. Chilean Journal of Agricultural Research, 69, 486–495. DOI:10.4067/S0718-58392009000400002.

Parajuli, R., Kristensen, I.S., Knudsen, M.T., Mogensen, L., Corona, A., et. al. (2017). Environmental life cycle assessments of producing maize, grass-clover, ryegrass and winter wheat straw for biorefinery. Journal of Cleaner Production, 142, 3859–3871. DOI:10.1016/j.jclepro.2016.10.076.

Pérez, R., Fernández, C., Laca, A. & Laca, A. (2024). Evaluation of environmental impacts in legume crops: a case study of pgi white bean production in Southern Europe. Sustainability, 16, 8024. DOI:10.3390/su16188024.

Reynoso-Camacho, R., Ramos-Gomez, M., & Loarca-Pina, G. (2006). Bioactive components in common beans (Phaseolus vulgaris L.). In Advances in Agricultural and Food Biotechnology (pp. 217–236). Research Signpost.

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2023). Cierre agrícola. https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/.

Suárez-Martínez, S.E., Ferriz-Matínez, R.A., Campos-Vega, R., Elton-Puente, J.E., de la Torre-Carbot, K., & García-Gasca, T. (2016). Bean seeds: leading nutraceutical source for human health. CyTA. Journal of Food, 14(1), 131–137. DOI:10.1080/19476337.2015.1063548.

Tidåker, P., Karlsson Potter, H., Carlsson, G., & Röös, E. (2021). Towards sustainable consumption of legumes: How origin, processing and transport affect the environmental impact of pulses. Sustainable Production and Consumption, 27, 496–508. DOI:10.1016/j.spc.2021.01.017.

ARTÍCULO CIENTÍFICO

CFD SIMULATION BASIS FOR AN INDUSTRIAL MALT GERMINATOR

María José Ramírez-Rivera, Christian O. Díaz-Ovalle, Cesar L. Aguirre-Mancilla, Ma. Cristina Vázquez-Hernández*

Abstract

Germination of barley follows a rigorous control of the operative conditions upon the grain, with the main parameters being the grain moisture, air humidity, temperature, air mass flow, and residence time. The unpredictable deviations yield undesirable characteristics of the product, such as over-germination, embryo death, and unachieved quality parameters. These problems come from the inhomogeneity conditions on the grain bed and its dependency on the ventilation system. This work presents a strategy for simulating an industrial germinator using the CFD technique. The system is a 2D computational domain with dimensions for industrial equipment. The grain bed is a porous system under elemental principles. The results demonstrated that the airflow through the porous medium generates an inverse effect on the temperature and turbulence after crossing the grain bed.

Keywords

Barley Germination, Simulation, porous medium, turbulence

Resumen

La germinación de malta es un proceso que controla las condiciones de la cebada, donde la humedad, temperatura, flujo de aire y tiempo son los parámetros controlables. Las desviaciones de los valores de control provocan problemas en la operación, como exceso de germinación, muerte del embrión e incumplimiento con estándares del producto. Estos problemas están ligados a la homogeneidad de las características de la cama del grano y dependen de la hidrodinámica del sistema de ventilación. Este trabajo presenta una estrategia para simular un germinador industria bajo la técnica de CFD. El sistema es un dominio computacional con las características de un equipo industrial. La cama de grano es un sistema poroso bajo consideraciones básicas. Los resultados indicaron que el flujo del aire en el lecho poroso influye inversamente con la temperatura y turbulencia al cruzar la cama de grano.

Palabras claves

Germinación, Simulación, medio poroso, turbulencia

Departamento de Ingenierías, Tecnológico Nacional de México/I. T. Roque, carretera Celaya-Juventino Rosas km 8.0 Celaya, Gto., 38124, México.
*autor de correspondencia: christian.do@roque.tecnm.mx

1. Introduction

Malt is a raw material for the brewing industry. The malt production from barley consists of three elemental stages: steeping, malting, and kilning. The steeping process promotes absorption, activating the enzymes within the kernel and increasing the inner water content to 42-47% (MacLeod and Evans, 2016; Cu et al., 2016). The malting stage takes between 3 and 5 days under controlled conditions to yield the growth of rootlets and acrospire, enzyme formation, and metabolic changes (Kunze, 2004; Finch-Savage & Leubner-Metzger, 2013). The malt kilning stops germination, reduces the water content, and yields the final color and flavor characteristics for the malt (Kunze, 2004; Bamforth, 2009). Particularly, germination is a delicate process that regulates water absorption in barley under controlled conditions of temperature, humidity, and airflow (Tian et al., 2010). Uncontrolled parameters modify malt quality and produce undesirable final aspects (Farzaneh et al., 2017).

Process analysis is a tool to predict and understand the operative conditions in a unit process. Computational Fluid Dynamics (CFD) is a numerical technique that reveals results for most of the food engineering processes (Kuriakose & Anandharamakrishnan, 2010; Sun, 2019). This technique has analyzed the brewing industry in some of its processes, such as mashing, lautering, and boiling (Jagiełło & Ludwig, 2024). Nevertheless, this technique has not been applied in the malting process. This work develops a CFD simulation for a circular malting box to explain the flow patterns through the grain bed and prevent inhomogeneity problems.

2. Metodology

The CFD methodology contains four stages: geometry development, meshing, model considerations, and solution. In this work, the first stage represented a central plane for the 2D geometry of a circular malting box, with the bed of grain as a porous medium. Figure 1 a) depicts the sizing of this computational domain. In meshing stage, the domain receives a mesh of 25,773 square-shaped elements with a skewness of 0.0055, which indicates a high mesh quality due to the orthogonal design. Nevertheless, the zone near to the inlet boundary presented a low orthogonal quality due to the wall shape. Figure 1 b) shows the mesh distribution in the domain. The development of the geometry and meshing was possible in the Design Modeler ® and Meshing Processor of ANSYS ®, respectively.

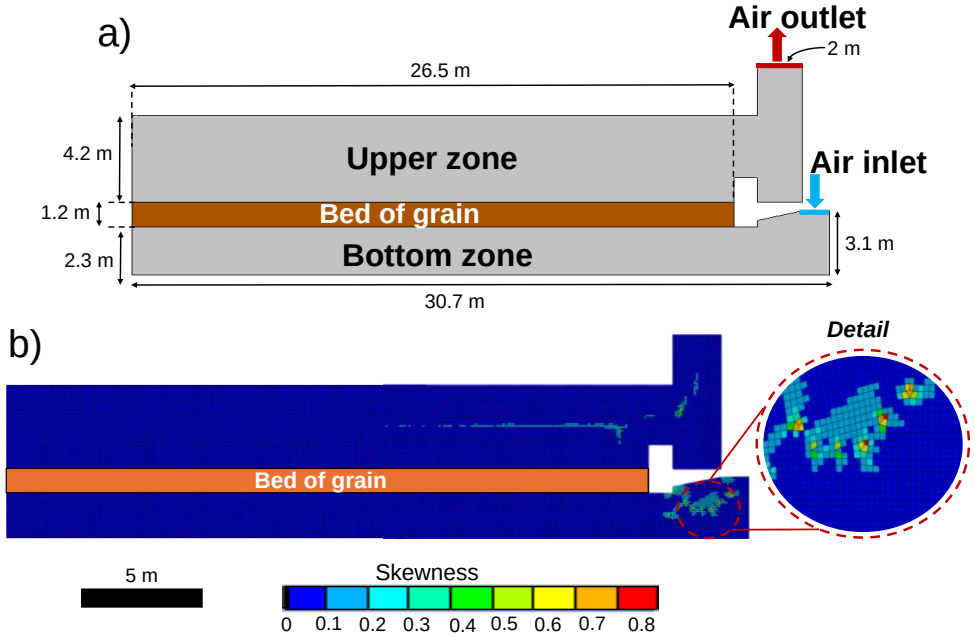

Figure 1. Plane view of a germination system: a) sizing description and b) meshing.

The system core is composed of a bed of grain with a density of 691.85 kg/m^3, a porosity of 0.43, an interfacial area of 800 m^{-1}, and a viscous inertial resistance factor of 698 (Carrera Rodríguez et al., 2011). The airflow is considered an ideal gas (1.225 kg/m^3 at 17°C) with a mass flow rate of 25 kg/s in the inlet boundary and mass conservation for the outlet boundary. The κ-ε Realizable turbulence model was applied to this case, considering vorticity and wall effects, as well as turbulence generation. Table 1 contains the governing equations for this isothermal scenario. Finally, the solution applied the Coupled algorithm by considering the second-order upwind interpolation scheme and hybrid initialization (solving the Laplace equation for the system).

Table 1. Governing equations for this case study.

Description	Equation
Mass conservation	$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0$
Momentum conservation	$\rho\left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial v_i v_j}{\partial x_j}\right) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu\frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} + g_i\rho$
Kinetic turbulence energy conservation	$\rho\left(\frac{\partial \kappa}{\partial t} + \frac{\partial v_j \kappa}{\partial x_i}\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left((\mu + \mu_t)\frac{\partial \kappa}{\partial x_j}\right) + 2\mu_t\frac{\partial v_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right) - \rho\varepsilon$
Turbulence dissipation rate conservation	$\rho\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial v_i \varepsilon}{\partial x_i}\right) = -\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{1.3}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) + 2.88\mu_t\frac{\varepsilon}{\kappa}\frac{\partial v_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right) - 1.92\rho\frac{\varepsilon^2}{\kappa}$
Nomenclature	v: velocity, x: coordinates, P: pressure, g: gravity, μ: viscosity, ρ: density, μ_t: turbulence viscosity ($0.09\rho\kappa^2/\varepsilon$), i and j: indexes of coordinates.

3. Results

This analysis evaluates the airflow parameters through the bed of grain: velocity and turbulence kinetic energy, κ. The high velocity values were near the inlet and outlet boundaries. In the bottom zone, the obstruction effect of the floor produced a sudden change in direction and the airflow accelerated on the floor. In response, the kinetic energy allows a spatial distribution of the velocity before the bed of grain. The flow through the bed presented linear patterns. At the upper zone, the air patterns changed direction by the ceiling, and the response was a global spatial distribution toward the outlet boundary. The narrowing shape of the upper zone accelerates the airflow until it leaves the system. Figure 2 shows the airflow patterns.

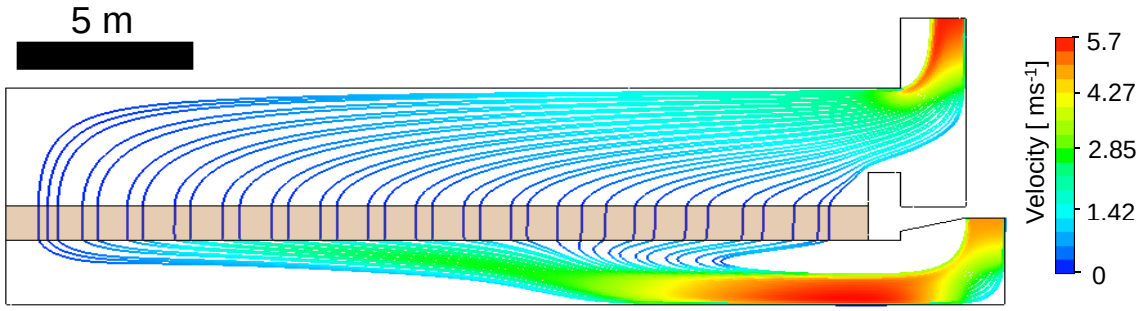

Figure 2. Velocity profile with stream lines for the case study.

The behavior of the κ parameter did not totally concur with the velocity response. The high turbulence region was at the bottom zone over the high-velocity zone. This response came from a secondary flow pattern along the airflow distribution, before the bed of grain. Similarly, the left region in the bottom zone increased the κ parameter. Both turbulence regions responded to the flow distribution before getting to the bed of grain. Finally, the upper zone presented high turbulence zones at the outlet boundary and on the bed of grain.

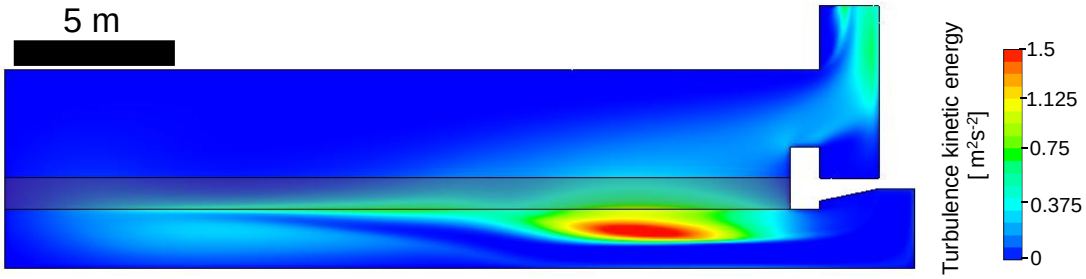

Figure 3. Profile for the kinetic energy turbulence.

4. Conclusions

The application of the CFD tool to the industrial mating process described the airflow. In principle, the bed of grain influenced the flow pattern before crossing it. The air distribution in the bottom zone generated turbulence regions due to secondary flows from the wall obstructions. The upper zone followed the flow patterns through the bed of grain. This description is remarkable for keeping homogeneous conditions throughout the bed of grain. Therefore, the CFD application in germination is suitable for predicting and maintaining desirable conditions to guarantee the quality of malt.

References

Bamforth, C.W. (2009). Current perspectives on the role of enzymes in brewing. *Journal of Cereal Science*, 50(3), 353-357.

Carrera Rodríguez, M., Martínez González, G.M., et al. (2011). Transient numerical study of the effect of ambient temperature on 2-D cereal grain storage in cylindrical silos. *Journal of Stored Products Research*, 47(2), 106-122.

Cu, S., Collins, H. M., Betts, N.S., March, T.J., Janusz, A., et al. (2016). Water uptake in barley grain: Physiology; genetics and industrial applications. *Plant Science*, 242, 260-269.

Farzaneh, V., Ghodsvali, A., Bakhshabadi, H., Zare, Z., & Carvalho, I.S. (2017). The impact of germination time on some selected parameters through malting process. International *Journal of Biological Macromolecules*, 94, 663-668.

Finch-Savage, W.E., & Leubner Metzger, G. (2013). Seed dormancy and the control of germination. *New Phytol*, 171(3), 501-523.

Kuriakose, R. & Anandharamakrishnan, C. (2010). Computational fluid dynamics (CFD) applications in spray drying of food products. *Trends in Food Science & Technology*, 21(8), 383-398.

MacLeod, L., & Evans, E. (2016). Barley: Malting. In C. Wrigley, H. Corke, K. Seetharaman, & J. Faubion (Eds.). *Encyclopedia of Food Grains*. Academic Press.

Tian, B., Xie, B., et al. (2010). Physicochemical changes of oat seeds during germination. *Food Chemistry*, 119(3), 1195-1200.

Jagiełło, K., & Ludwig, W. (2024). Towards computational fluid dynamics applications in brewing process. *European Food Research and Technology*, 250(2), 361-373.

Kunze, W. (2004). Technology brewing and malting. VLB Berlin.

Sun, D.-W. (2019). Computational Fluid Dynamics in food processing. CRC Press

ARTÍCULO CIENTÍFICO

ANÁLISIS DEL ESQUEMA DE INTERPOLACIÓN EN LA FORMACIÓN DE ENSUCIAMIENTO DE LECHE EN UN SISTEMA HELICOIDAL

Ana Camila Palacios-Soto, María José Ramírez-Rivera, Erika Ramos-Ojeda*

Resumen

El ensuciamiento de los procesos térmicos de leche es un fenómeno indeseable que reduce la eficiencia térmica y aumenta los costos de limpieza. La literatura presenta una diversidad de trabajos en el diseño de equipos para reducir la generación de ensuciamiento. Este trabajo describe una estrategia numérica para estudiar la formación de ensuciamiento como reacción de pared. El sistema es un intercambiador de calor helicoidal con el fin de fomentar y detallar el fenómeno de ensuciamiento. La metodología aplica Dinámica Computacional de Fluidos considerando los parámetros: número de iteraciones y esquema de interpolación en la celda. Los resultados mostraron una diferencia en la formación de ensuciamiento bajo los esquemas de interpolación propuestos, lo cual es relevante para una reacción en la pared. Este análisis es un planteamiento elemental para estudios posteriores y detallados sobre el comportamiento y formación de ensuciamiento.

Palabras clave:

Reacción, esquema de interpolación, turbulencia, CFD.

Abstract

Milk fouling is an undesirable phenomenon that reduces the thermal efficiency and increases the cleaning costs. The published works have studied the formation of fouling to improve the design of heat exchangers. This work contains a numerical strategy to elucidate the formation of fouling as a wall reaction. The system is a helicoidal heat exchanger to promote and detail the formation of fouling. The methodology applied CFD simulation and considered the parameters: number of iterations and cell interpolation scheme. The results presented a difference in the formation of fouling under the diverse interpolation schemes, which is relevant for a wall reaction. This analysis is fundamental for further and detailed studies about the formation of fouling.

Keywords:

Reaction, interpolation scheme, turbulence, CFD.

Departamento de Ingenierías, Tecnológico Nacional de México/I. T. Roque, carretera Celaya-Juventino Rosas km 8.0, Celaya, Gto., 38124, México.
*autor de correspondencia: d25981019@roque.tecnm.mx

1. Introducción

El ensuciamiento lácteo es un fenómeno recurrente en los procesos de transferencia de calor, caracterizado por la deposición no deseada de materiales sobre las superficies de los equipos. Este proceso proviene de una exposición prolongada a temperaturas elevadas y es caracterizado por transformaciones fisicoquímicas en las proteínas, como solidificación, degradación y cambio estructural (Wilson, 2018). Principalmente, la desnaturalización de la β-lactoglobulina (β-Lg) fundamenta este fenómeno (de Wit & Klarenbeek, 1989) y sus modificaciones repercuten en la adherencia progresiva de material a las superficies. Estudios previos han detallado las reacciones químicas de la desnaturalización de β-Lg, como autooxidación, polimerización y descomposición térmica (Jong y col., 1992; Watkinson y Wilson, 1997). En general, la afectación de este problema es la reducción de la eficiencia térmica de los sistemas de intercambio de calor y los paros continuos para lavado (Fryer, 1989; Jeurnink &Brinkman, 1994).

Numerosos estudios han abordado el análisis del ensuciamiento desde diferentes enfoques. Visser y Jeurnink (1997) identificaron los principales factores que determinan la formación de depósitos y Jun y Puri (2005) desarrollaron modelos matemáticos orientados a su prevención y mitigación en sistemas de transferencia de calor. Sadeghinezhad et al. (2013) analizaron la influencia de las propiedades de la superficie en la adherencia de material. Por otra parte, Petit y col. (2013) realizaron un estudio dimensional que explica el incremento del ensuciamiento en intercambiadores de calor de placas, y Huppertz & Nieuwenhuijse (2022) profundizaron sobre el efecto de los componentes de la leche (proteínas y minerales) en la generación de incrustaciones durante el calentamiento.

A pesar de los numerosos avances en la comprensión del fenómeno, la mayoría de los estudios reportados se han enfocado en equipos convencionales como intercambiadores de placas o evaporadores de película descendente (Ramírez-Rivera et al., 2024). En general, el aumento del ensuciamiento es posible a bajas velocidades, altas temperaturas y obstrucciones en el flujo de calor. No obstante, análisis teóricos no han sido presentados para detallar el desarrollo del ensuciamiento. Este trabajo presenta una estrategia para precisar la predicción en el ensuciamiento bajo la técnica numérica de CFD. El caso de estudio propuesto incentiva la formación de ensuciamiento para determinar los parámetros numéricos de mayor influencia durante la simulación CFD en una reacción de pared. Las siguientes secciones describen la estrategia convencional de CFD para el fenómeno de ensuciamiento.

2. Metodología

El sistema es intercambiador de calor en forma helicoidal para promover la generación de ensuciamiento con mayor área de transferencia de calor y aumento en la obstrucción del flujo. El análisis fue posible con el paquete comercial ANSYS® Fluent 2025R2 y consistió en: a) elaboración del dominio computacional, b) desarrollo de la malla del sistema y c) solución numérica.

2.1 Dominio computacional

La geometría fue realizada en Design Modeler ® y consistió de una coraza cilíndrica de 5 cm de diámetro y 30 cm de longitud, con un sistema helicoidal interno basado en una forma circular de 1.5 cm de diámetro y 10 giros exactos. La Figura 1a) contiene la imagen de este dominio computacional. La discretización del sistema uso el paquete Meshing ANSYS ® y generó una malla de 167,861 elementos tetraédricos. La calidad de malla está basada en la distorsión de los elementos con un valor máximo de 0.2542 (el valor cercano a cero indica una aceptable calidad de malla). La Figura 1 b) representa este resultado bajo la distribución de la distorsión de los elementos.

2.2 Condiciones de frontera

El fluido fue leche (densidad, 1017 kg/m^3, capacidad calorífica, 3.849 kJ/kgK, conductividad térmica, 0.53 W/mK) con de 3.5% de proteína e ingresó con velocidad de 0.01 m/s a 85°C. La pared helicoidal consideró una resistencia convectiva con coeficiente de transferencia de calor de 100 W/m^{2}K y temperatura de 90°C. La salida del fluido conservó la cantidad de materia de entrada.

2.3 Ecuaciones de gobierno

El análisis consideró un sistema en estado estable, no-isotérmico y turbulento, lo cual es representado por las ecuaciones de continuidad, momentum y turbulencia que se encuentran en la Tabla1. El modelo de turbulencia fue κ−ε estándar.

La formación de ensuciamiento proviene de la deposición y desnaturalización de β-lg. El modelado sigue expresiones cinéticas de cuatro fases: desnaturalización de la β-lg nativa (N) en estado desplegado (U), generación de proteína agregada (A) y depositada en la pared (D). Jong et al. (1993) propusieron el modelo cinético bajo observaciones experimentales (Ecuación

1), donde r es la velocidad de reacción, C la concentración molar, k el parámetro cinético y los subíndices son propios para las fases de la proteína (N, U, A y D). El parámetro cinético sigue el modelo de Arrhenius (Ecuación 2) cuyos valores provienen de de Wit & Klarenbeek (1989), de Jong et al. (1992) y de Jong et al. (1993), respectivamente.

2.3. Solución numérica

La simulación fue resuelta con 1000 iteraciones en estado estable bajo el algoritmo SIMPLEC con inicialización estándar desde la condición de frontera de entrada. La solución fue posible con un procesador Intel® Corel ™ i5-12450H 2 GHz de 16 GB de RAM.

2.4 Prueba de iteraciones

La prueba de independencia de iteraciones determina un número de iteraciones suficientes para realizar las simulaciones. Esto describe que la solución es independiente del número de iteraciones, y que el tiempo computacional puede ser reducido. En este caso, el esquema de interpolación de primer orden fue considerado para probar 800, 1000, 2000, 5000 y 10000 iteraciones.

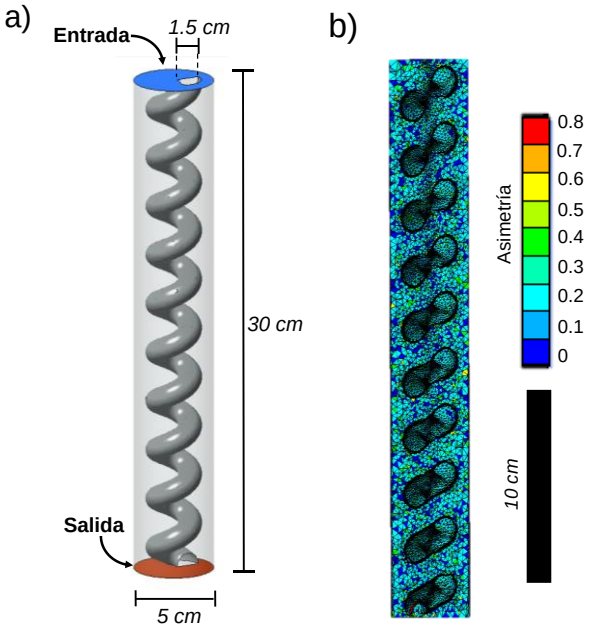

Figure 1. Sistema de intercambiador de calor helicoidal ®: a) descripción del dominio computacional y b) discretización del sistema.

Tabla 1. Ecuaciones de gobierno para la simulación CFD propuesta.

Nombre	Ecuación
Conservación de la masa	$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0$
Conservación de momentum	$\rho\left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial v_i v_j}{\partial x_j}\right) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu\frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} + g_i\rho$
Energía cinética de turbulencia	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\kappa v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \mu_t)\frac{\partial \kappa}{\partial x_j}\right] - \rho\varepsilon$
Energía de disipación de turbulencia	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{1.3}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + 1.44\frac{\varepsilon}{\kappa} - 1.92\rho\frac{\varepsilon^2}{\kappa}$
Nomenclatura	v: velocidad, x: coordenada, P: presión, g: gravedad, μ: viscosidad, ρ: densidad, μ_t: viscosidad de turbulencia (0.09 ρ κ^2/ε), κ: energía cinética de turbulencia, ε: disipación de turbulencia, i y j: índices de las direcciones.

$$\left.\begin{aligned} -r_N &= k_U C_N \\ r_U &= k_U C_N - k_A C_U^2 - k_D C_U \\ r_A &= k_A C_U^2 \\ r_D &= k_D C_U \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

$$\left.\begin{aligned} k_U &= \left(3.37\times10^{37}\, s^{-1}\right) e^{\frac{-0.261\,J/mol}{RT}} \\ k_A &= \left(1.36\times10^{43}\, s^{-1}\right) e^{\frac{-0.312\,J/mol}{RT}} \\ k_D &= \left(0.51 s^{-1}\right) e^{\frac{-0.0451\,J/mol}{RT}} \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

2.5 Prueba del esquema de interpolación

Esta prueba consideró los esquemas disponibles por ANSYS Fluent: primer y segundo orden en dirección del flujo, esquema de tercer orden de interpolación para cinética convectiva (QUICK por sus siglas en inglés) y monotonicidad para las leyes de conservación (MUSCL por sus siglas en inglés). Los esquemas de dirección de flujo proponen el concepto de celda donante promediando bajo derivades centrales. No obstante, el esquema de primer orden (FOUS, por sus siglas en inglés) genera un problema de falsa difusión (Yeoh & Tu, 2010). El esquema de segundo orden (SOUS, por sus siglas en inglés) expande una serie de Taylor sobre la derivada central, aplica un vector de distancia para evaluar los gradientes a lo largo de las caras y logra un sistema matricial para determinar los gradientes (Barth & Jesperson, 1989). El esquema QUICK aplica una interpolación cuadrática con valores peso basados en la dirección del flujo y con ajustes geométricos al tipo de malla (Leonard, 1979). El esquema MUSCL es una combinación lineal del esquema central y el de segundo orden (van Leer, 1997; van Leer & Nishikawa, 2021). Así, estos esquemas son comparados sobre la formación de ensuciamiento en la pared del intercambiador helicoidal.

3. Resultados

Las pruebas realizadas cuantificaron el área ocupada por ensuciamiento a lo largo del serpentín. El ensuciamiento correspondió al contorno de la fracción másica de proteína depositada (D) con valor mayor a $1.4\text{x}10^{-8}$. La prueba de independencia de iteraciones presentó una evolución numérica de esta área con aumento hasta un valor estable después de 5000 iteraciones. La Figura 2 representa el resultado de esta prueba. Así, las pruebas restantes aplicaron 5000 iteraciones. La comparación de los esquemas de interpolación cuantificó el área de ensuciamiento. Estos resultados presentaron una diferencia del 4.5% entre el esquema FOUS y los restantes, ya que los esquemas SOUS y QUICK lograron idénticos valores y el MUSCL un valor cercano a estos. La Tabla 2 resume estos valores. Dada la naturaleza de la formulación de cada esquema, el SOUS es aceptable para resolver el problema de ensuciamiento sin una demanda numérica adicional en la solución del problema y con una estabilidad numérica aceptable.

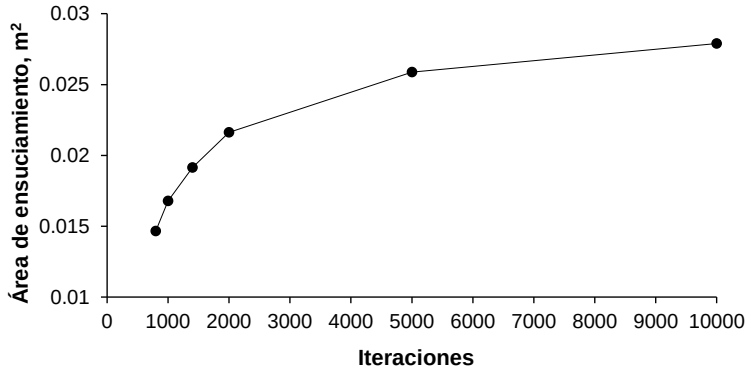

Figura 2. Comportamiento del ensuciamiento respecto a las iteraciones.

Tabla 2. Resultados de prueba de esquema de interpolación

Esquema de interpolación	Área de ensuciamiento (cm^2)
FOUS	250.946
SOUS	261.867
QUICK	261.867
MUSCL	261.975

El análisis CFD aplicó a la distribución de temperatura, velocidad y área de ensuciamiento en el sistema, como muestra la Figura 3 con planos XY. La distribución de temperatura sigue un aumento en la zona de salida del flujo en respuesta al tiempo de residencia del fluido dentro del intercambiador. La zona interna del helicoidal presentó mayor aumento de temperatura a diferencia de la zona circundante. Esto es esperado dada la transferencia de calor desde las paredes del helicoidal. La Figura 3 a) describe este patrón.

El perfil de velocidad presentó el efecto de la obstrucción de la forma helicoidal. En las paredes externas, la velocidad fue cero dada la condición de no deslizamiento. Sin embargo, cerca de las paredes internas, el efecto de la obstrucción de los giros del helicoidal generó un aumento de la velocidad. Esto demuestra cambios de velocidad al acercarse a la pared del helicoidal. La Figura 3 b) demuestra este comportamiento, donde la gráfica es tomada a partir de dos líneas cercanas a las paredes (roja y negra). Este comportamiento oscilatorio fue descrito para un caso similar por Xijun et al. (2026). La oscilación existió a lo largo del helicoidal en respuesta a la obstrucción de las vueltas.

La formación de ensuciamiento fue predominante en la parte exterior del helicoidal. La Figura 3 c) contiene la zona de mayor formación de ensuciamiento circundada por las líneas de corriente, predominando las exteriores. Un detalle de esta imagen enfoca el perfil de la fracción másica de la proteína (D). Esto describe zonas de baja formación en la parte central de helicoidal y la formación paulatina en dirección del flujo. Las vueltas de la geometría generaron una obstrucción en la zona central, lo cual impactó en el aumento de la turbulencia y redujo el ensuciamiento. Esta relación inversa de la turbulencia y el ensuciamiento sigue lo descrito por Visser & Jeurnink (1997).

4. Conclusiones

La técnica de CFD presenta una diversidad de aproximaciones numéricas para la solución de problemas de flujo. En este caso, el ensuciamiento sobre superficies de calentamiento es una reacción de pared que depende del esquema de interpolación. Este trabajo comparó cuatro esquemas de interpolación de ANSYS Fluent, donde el SOUS fue una estrategia robusta y próxima a las de mayor consumo computacional. Por otra parte, el escenario presentado (intercambiador de calor con geometría helicoidal) describió una respuesta esperada para el fenómeno de ensuciamiento.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de SECIHTI, México, a través de la beca 1260180.

Referencias

Barth, T.J., & Jesperson, D.C. (1989). The design and application of upwind schemes on unstructured meshes. AIAA Journal, Paper 89-0366.

de Jong, P., Waalewijn, R., & van der Linden, H.J.L.J. (1993). Validity of a kinetic fouling model for heat-treatment of whole milk. Lait, 73(3), 293-302. DOI: 10.1051/lait:1993327.

de Jong, P.D., Bouman, S., & van der Linden, H.J.L.J. (1992). Original Papers and Proceedings: Fouling of heat treatment equipment in relation to the denaturation of β-lactoglobulin. International Journal of Dairy Technology, 45(1), 3-8.

de Wit, J., & Klarenbeek, G. (1989). Technological and functional aspects of milk proteins. En Milk Proteins: Nutritional, Clinical, Functional and Technological Aspects (pp. 211-222). Springer.

Fryer, P. (1989). The uses of fouling models in the design of food process plant. International Journal of Dairy Technology, 42(1), 23-29.

Huppertz, T., & Nieuwenhuijse, H. (2022). Constituent fouling during heat treatment of milk: A review. International Dairy Journal, 126, 105236. DOI: 10.1016/j.idairyj.2021.105236

Jeurnink, T.J., & Brinkman, D.W. (1994). The cleaning of heat exchangers and evaporators after processing milk or whey. International Dairy Journal, 4(4), 347-368.

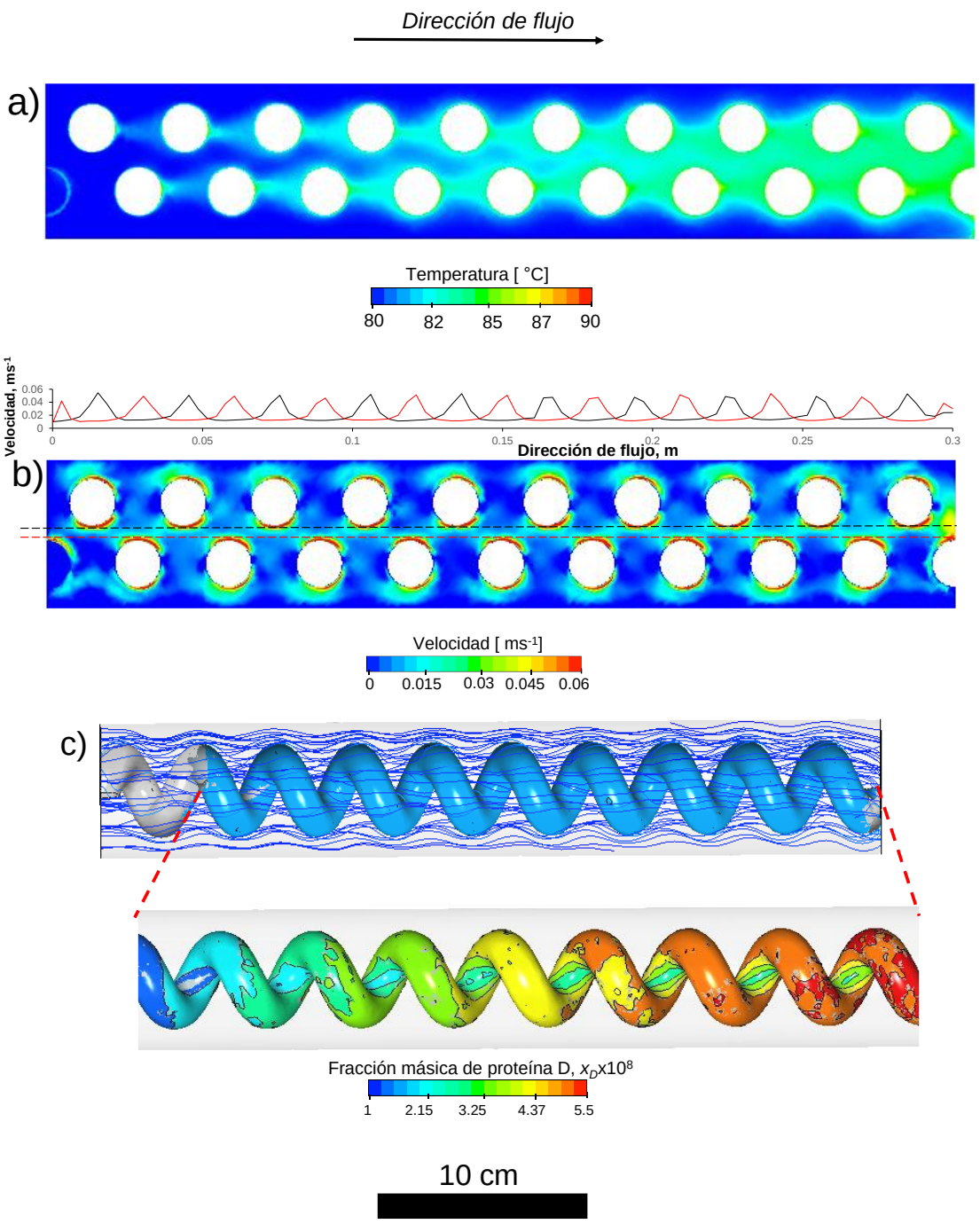

Figura 3. Resultados de la simulación CFD del sistema helicoidal: a) perfil de temperatura, b) perfil de velocidad, y c) área de ensuciamiento.

de Jong, P, Bouman, S., & van der Linden, H.J.L.J. (1992). Fouling of heat treatment equipment in relation to the denaturation of β-lactoglobulin. Journal of the Society of Dairy Technology, 45, 3-8.
DOI: 10.1111/j.1471-0307.1992.tb01715.x

Jun, S., & Puri, V. (2005). Fouling models for heat exchangers in dairy processing: A review. Journal of food process engineering, 28(1), 1-34.

Leonard, B.P. (1979). A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 19(1), 59-98.

Petit, J., Six, T., Moreau, A., Ronse, G., & Delaplace, G. (2013). β-lactoglobulin denaturation, aggregation, and fouling in a plate heat exchanger: Pilot-scale experiments and dimensional analysis. Chemical Engineering Science, 101, 432-450.
DOI: 10.1016/j.ces.2013.06.045

Ramírez-Rivera, M.J., Díaz-Ovalle, C.O., Ramos-Ojeda, E., & Castrejón-González, E.O. (2024). CFD simulation analysis of fouling formation in a milk falling-film evaporator. Food and Bioproducts Processing, 143, 242-254.
DOI: 10.1016/j.fbp.2023.12.003

Sadeghinezhad, E., Kazi, S.N., Badarudin, A., Zubair, M.N.M., et al. (2013). A review of milk fouling on heat exchanger surfaces. Reviews in Chemical Engineering. 29(3), 169-188.
DOI: 10.1515/revce-2013-0003 ().

van Leer, B. (1997). Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme. Journal of Computational Physics, 135(2), 229-248.

van Leer, B., & Nishikawa, H. (2021). Towards the ultimate understanding of MUSCL: Pitfalls in achieving third-order accuracy. Journal of Computational Physics, 446, 110640.

Visser, J., & Jeurnink, T.J.M. (1997). Fouling of heat exchangers in the dairy industry. Experimental Thermal and Fluid Science, 14(4), 407-424.
DOI: 10.1016/S0894-1777(96)00142-2

Watkinson, A.P., & Wilson, D.I. (1997). Chemical reaction fouling: A review. Experimental Thermal and Fluid Science, 14(4), 361-374.
DOI: 10.1016/S0894-1777(96)00138-0

Wilson, D.I. (2018). Fouling during food processing – progress in tackling this inconvenient truth. Current Opinion in Food Science, 23, 105-112.
DOI: 10.1016/j.cofs.2018.10.002.

Xijun, Z., Kaiwen, Q., & Xiaobin, T. (2026). Simulation of flow field characteristics around longitudinally staggered variable-curvature helical coil bundles. Nuclear Engineering and Design, 446, 114632.

Yeoh, G.-H., & Tu, J. (2010). Computational techniques for multi-phase flows: Butterworth-Heinem.