



MEMORIA

Mesa 2C

Innovación, Tecnología y Transformación Digital

Octubre 2026

Índice

Resultados de Pruebas Realizadas a las Estructuras de Protección Utilizadas en Tractores Agrícolas en México.....	3
Modelo físico-matemático con inteligencia artificial para optimizar el uso de agua en parcelas agrícolas	12
BIOETASURA: Bioetanol a partir de la basura orgánica del mercado municipal.	23
Estudio de una Planta Agroindustrial Procesadora de Aceite de Oliva en la Provincia de Sevilla España	31
Viabilidad financiera del sistema de riego por goteo subterráneo en el cultivo de alfalfa (<i>Medicago sativa</i>) en la región centro-sur del estado de Chihuahua.....	48
Modelo de Negocio de una Microempresa Proveedora de Herramientas para la Gestión del Agua	67
STEM rural Oaxaca: implementación de un modelo educativo STEM para el desarrollo territorial y la innovación social en comunidades rurales.	76
Innovación socio-técnica, gobernanza territorial y resiliencia agroalimentaria en Atlautla, Estado de México.....	85
Diseño de una planta procesadora de frijol en Zacatecas para incrementar el valor agregado de la producción.....	100

Resultados de Pruebas Realizadas a las Estructuras de Protección Utilizadas en Tractores Agrícolas en México

Marco Antonio Audelo Benítez¹, Alma Velia Ayala Garay^{1*}, Esmeralda Marín Vázquez¹.

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Valle de México. Carretera los Reyes-Texcoco, Km.13.5, Coatlinchán, Texcoco de Mora, Estado de México, México. C. P. 56250.

*Autor para correspondencia: ayala.alma@inifap.gob.mx

Resumen

Las estructuras de protección contra volcaduras (ROPS) son componentes de seguridad críticos en tractores agrícolas, diseñadas para proteger al operador. En México no existe una normatividad obligatoria que evalúe el uso de ROPS, existe la NMX-O-181-SCFI-2016, la cual hace referencia al método de prueba para la evaluación de los ROPS, de la que su observancia no es obligatoria. El presente trabajo tiene por objetivo analizar los resultados de las pruebas realizadas bajo la norma mencionada, que permita evidenciar la importancia de la aplicación de esta de manera obligatoria. El análisis se efectuó en junio de 2025, resultados de 185 pruebas de tractores de diferentes marcas comercializadas en México. Estas pruebas fueron realizadas en el Centro Nacional de Estandarización de Maquinaria Agrícola (CENEMA). Los resultados fueron clasificados por el número de estructuras que cumplieron con la norma y ensayos que no lograron cumplirlas. De estos últimos se analizaron las principales causas por las que algunos dispositivos no lograron cumplirla. Estos ensayos fueron realizados de 2007 a 2023. Los resultados muestran que el 18% de las estructuras no cumplieron al realizarles la prueba y las causas principales se agrupan en fallas de diseño y en fallas en su ubicación con relación a los diferentes componentes del tractor. Finalmente, se puede ver la importancia de esta norma de manera obligatoria, ya que existe la posibilidad de que existan en el mercado tractores equipados con estructuras de protección que no cumplan con su objetivo, y pongan en riesgo a los operadores al momento de una volcadura.

Palabras clave: Seguridad, Normalización, Mecanización.

Abstract

Roll-over protective structures (ROPS) are critical safety components on agricultural tractors, designed to protect the operator. In Mexico, there is no mandatory regulation that evaluates the use of ROPS; there is the NMX-O-181-SCFI-2016 standard, which refers to the test method for ROPS evaluation, but its compliance is not mandatory. This paper aims to analyze the results of the tests conducted under the aforementioned standard to demonstrate the importance of making its application mandatory. The analysis was carried out in June 2025, using the results of 185 tests on tractors of different brands commercialized in Mexico. These tests were conducted at the National Center for Agricultural Machinery Standardization (CENEMA). The results were classified by the number of structures that complied with the standard and the tests that failed to do so. From the latter, the main causes why some devices failed to comply were analyzed. These tests were conducted from 2007 to 2023. The results show that 18% of the structures failed to comply when tested, and the main causes are grouped into design flaws and flaws in their location relative to the different components of the tractor. Finally, this highlights the importance of making this standard

mandatory, as there is a possibility that tractors equipped with protective structures that do not meet their objective are available on the market, putting operators at risk in the event of a rollover.

Keywords: Safety, Standardization, Mechanization

Introducción

Los tractores agrícolas son herramientas en la agricultura, facilitando una amplia gama de tareas desde la labranza hasta el transporte. No obstante, su diseño, que a menudo implica un centro de gravedad elevado y una alta capacidad de torque, los hace susceptibles a vuelcos (Galli, L., 2022). Los vuelcos pueden ocurrir en diversas circunstancias, ya sea durante el trabajo en el campo, la conducción por caminos rurales, o al realizar otras tareas como el transporte o el apisonado de hierba para ensilar (Sector agrario, 2004). De acuerdo con las estadísticas, el aplastamiento por vuelco del tractor es la primera causa de muerte en el sector agrario (Sector agrario, 2004). Los accidentes de tractor no solo son un problema inherente a la maquinaria, sino que también se ven agravados por factores humanos y ambientales. Las distracciones del conductor, las pendientes pronunciadas, la realización de trabajos cerca de canales, el exceso de velocidad y el uso de puntos de anclaje inadecuados son causas comunes de estos incidentes (Comunicaciones, 2024). Los vuelcos laterales son los más frecuentes, representando aproximadamente el 75% de los casos, seguidos por los vuelcos hacia atrás (20%) y, en menor medida, los vuelcos frontales (5%) (Galli, L., 2022).

Para mitigar las consecuencias de los vuelcos de tractores, se utilizan las Estructuras de Protección contra Volcaduras (ROPS) Un ROPS es una barra antivuelco o un armazón en forma de jaula diseñado para crear una zona de protección alrededor del operador en caso de que el tractor se vuelque (OSHA, 2025). Su función principal es proteger al operador, limitando el grado del vuelco a 90 grados y asegurando que se mantenga dentro de un "espacio de supervivencia" o "zona de protección" (Sector agrario, 2004). Cuando se utilizan correctamente junto con un cinturón de seguridad, las ROPS son extraordinariamente efectivas, con una tasa de éxito del 98% al 99% en la prevención de lesiones graves o muertes (Seguros Agrarios, 2023). Esta alta tasa de efectividad demuestra que la gran mayoría de las muertes por vuelco de tractor son, de hecho, prevenibles. Por la función que realizan estas estructuras, su diseño y fabricación deben ser validados a través de pruebas estrictas para asegurar que cumplen con los estándares de funcionamiento bajo condiciones simuladas de vuelco (Galli, L., 2022). No es suficiente con que exista un marco metálico; este debe ser un sistema de ingeniería preciso y rigurosamente probado.

A pesar de los avances tecnológicos y regulatorios, los accidentes por vuelco de tractor siguen ocasionando pérdidas humanas en el sector agrícola. En España, se registraron 1,004 muertes en accidentes de maquinaria agrícola en una década, de las cuales 880 (87.6%) estuvieron relacionadas con tractores (Seguros Agrarios, 2023). Un informe más detallado para el período 2010-2019 en España reveló que en el 91% de los vuelcos con resultado mortal, el tractor no disponía de una estructura de protección o la llevaba abatida (García-Ramos, F. et al., 2020). Esta observación es consistente con datos de Italia, donde entre 2008 y 2019, de 1,414 accidentes fatales monitoreados, la mayoría (57.6%) involucró tractores sin ROPS, y un 19.4% adicional tenía ROPS plegables que se encontraban abatidos en el momento del accidente (Reynolds, S. y Groves, W., 2000).

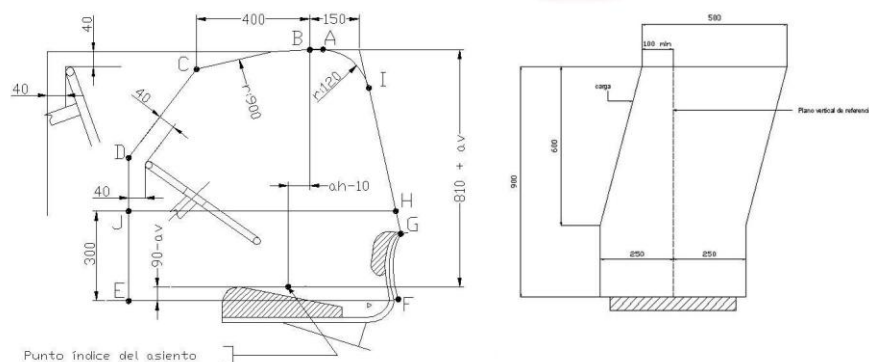
Estos datos muestran que la mayoría de las muertes por vuelco de tractor podrían haberse evitado, si se hubiera dispuesto de un ROPS y el operador hubiera utilizado el cinturón de seguridad

(Seguros Agrarios, 2023). La eficacia de los ROPS es incuestionable, con estudios que demuestran una reducción de hasta el 98% en las fatalidades relacionadas con vuelcos (Cole, H., Myers, M. y Westneat, S., 2016). En los países europeos las pruebas de ROPS son obligatorias para la homologación de tractores, lo que convierte la certificación en un requisito legal para la comercialización de estos vehículos (Galli, L., 2022). Esta exigencia regulatoria subraya que las pruebas no son solo un trámite, sino un paso fundamental de control de calidad y validación que asegura que la estructura se deformará de manera predecible, absorberá la energía correctamente y mantendrá la zona de seguridad, protegiendo así al operador en lugar de crear nuevos peligros. La adhesión a los estándares de prueba y la certificación por laboratorios competentes son, por lo tanto, pilares de la seguridad en la maquinaria agrícola.

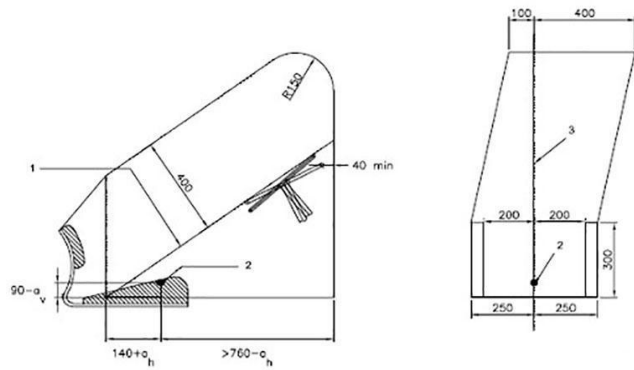
Para el caso de México, no existe una regulación que obligue al uso de una estructura de protección probada o certificada en los tractores que se comercializan en nuestro país. La Norma Oficial Mexicana NOM-007-STPS-2000, establece las condiciones de seguridad con que deben contar las instalaciones, maquinaria, equipo y herramientas utilizadas en las actividades agrícolas para prevenir riesgos a los trabajadores (STPS, 2002); aquí se hace mención a que los tractores, y otras máquinas autopropulsadas, deben contar con una estructura circundante al operador que lo proteja contra el sol y volcaduras. Por otro lado, la Norma Mexicana NMX-O-181-SCFI-2016 especifica los métodos de prueba estática para cabinas y marcos de protección en tractores agrícolas y forestales (SE, 2019), la que actualmente se utiliza dentro del proceso de Certificación de Tractores Agrícolas, y de la que su observancia no es obligatoria. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es el de realizar un análisis de los resultados de las pruebas realizadas bajo la Norma Mexicana NMX-O-181-SCFI-2016, que permita mostrar la importancia de la aplicación de esta de manera obligatoria.

Materiales y métodos

Para el cumplimiento del objetivo de la investigación se analizaron los resultados de las pruebas aplicadas a 185 a tractores agrícolas conforme al método de prueba establecido en la norma NMX-O-181-SCFI-2016, Tractor Agrícola – Cabinas y Marcos de Protección de Tractores Agrícolas y Forestales – Especificaciones y método de prueba (Prueba estática), correspondiente al periodo 2007–2023 en el Laboratorio de Pruebas de tractores del CENEMA. El análisis consideró el resultado final de la prueba, el tipo de estructura, así como las causas que ocasionaron el no cumplimiento de la misma.



a)



b)

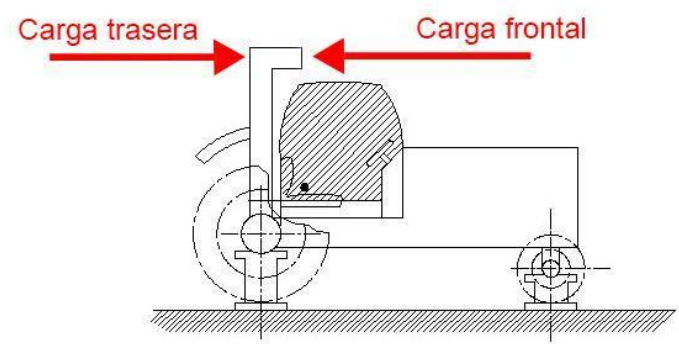
Figura 1. Zona de seguridad. a) Zona de seguridad para tractores con la estructura de protección montada en la parte trasera. b) Zona de seguridad para tractores con la estructura de protección montada en la parte delantera.

Este método de prueba establece que los ROPS son estructuras montadas a tractores agrícolas cuyo principal propósito es el de evitar o disminuir el riesgo para el operador resultante de una volcadura, esta se caracteriza por proveer de una zona de seguridad lo suficientemente grande para proteger al operador cuando se presente una volcadura. Esta zona es un volumen estandarizado (figura 1) que representa el espacio ocupado por el conductor cuando está sentado dentro de la estructura, y su integridad es el objetivo primordial de la evaluación de estas estructuras.

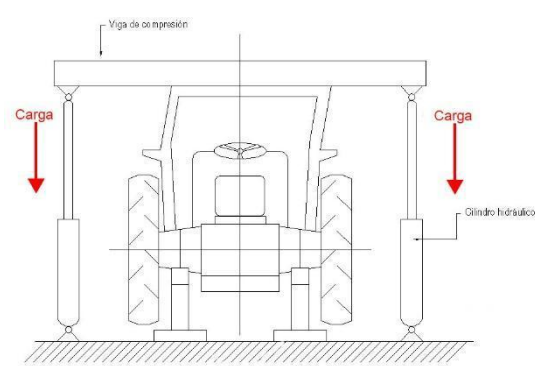
Durante un vuelco, el ROPS está diseñado para absorber la energía generada por el impacto con el suelo, pero con una deformación limitada para evitar la intrusión en esta zona de seguridad. Esto significa que la estructura debe ser lo suficientemente fuerte para soportar las cargas, pero también debe deformarse de manera controlada para disipar la energía sin colapsar sobre el operador. La capacidad del ROPS para mantener esta zona de seguridad es el objetivo primordial de las pruebas. No se trata simplemente de que la estructura permanezca intacta, sino de que lo haga sin comprometer el espacio vital del conductor. Esto requiere un equilibrio entre las propiedades de los materiales, la geometría estructural y las características de absorción de energía, que se consideran durante las fases de diseño. La prueba, por lo tanto, evalúa la interacción entre la estructura y el cuerpo teórico del operador durante un evento de vuelco, asegurando que el sistema de protección funcione como se espera.

La prueba consiste en aplicar cargas progresivas a la estructura de protección mediante cilindros hidráulicos en diferentes direcciones (lateral, longitudinal y vertical). El objetivo es medir la energía y la fuerza absorbida por la estructura y asegurar que no se produzca una invasión en la zona de seguridad del operador. La fuerza o energía aplicada en cada carga depende de la masa del tractor. La secuencia de aplicación de las cargas depende del tipo de estructura, de su ubicación con respecto al tractor y la distribución del peso con relación a los ejes de las ruedas traseras y delanteras. Inicia con una carga longitudinal en la parte trasera hacia adelante; la segunda es una carga de compresión en el mismo lado en donde se aplicó la carga trasera; la tercera es una carga lateral en el lado opuesto a la aplicación de la primera carga longitudinal; la cuarta es una segunda carga de compresión; finalmente hay una quinta carga de compresión que solo se aplica a los

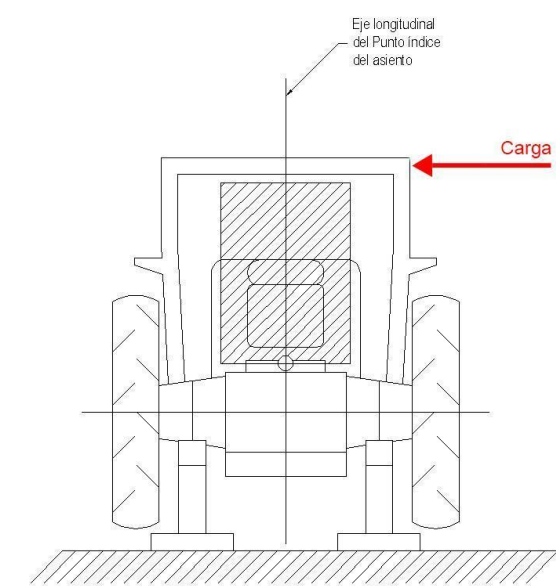
tractores con estructura de protección abatible. Durante la prueba, se registran datos como la fuerza aplicada, el desplazamiento de la estructura y la energía absorbida.



a)



b)



c)

Figura 2. Punto de aplicación y sentido de las cargas durante la prueba. a) Trasera y delantera. b) De compresión. c) Lateral.

Resultados y discusión

De los 185 ensayos realizados en el laboratorio de prueba con fines de certificación, los resultados indicaron que el 18% de las estructuras evaluadas (ver figura 3) no cumplieron con los criterios de aceptación establecidos en la norma NMX-O-181-SCFI-2016.

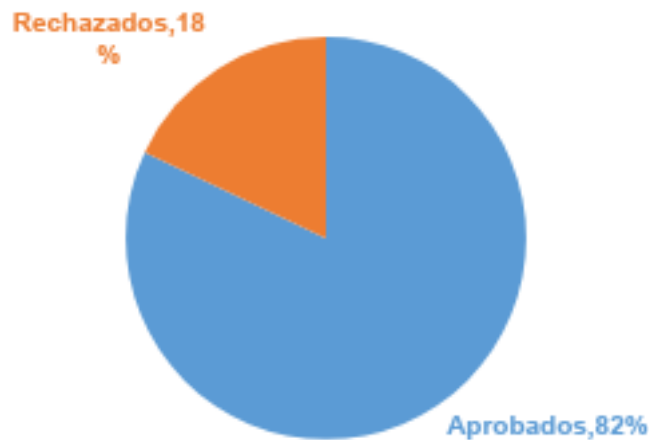


Figura 3. Porcentaje de estructuras aprobadas y rechazadas de acuerdo con los criterios establecidos en la norma NMX-O-181-SCFI-2016.

De acuerdo con los resultados de las pruebas realizadas, se identificaron seis causas principales por las que los equipos no cumplen con los criterios establecidos. Estas causas se pueden concentrar en dos grupos, el primero está relacionado con la invasión de la zona de seguridad durante las pruebas, mientras que el segundo corresponde a fallas estructurales al aplicar las cargas. En la figura 4 se muestran estas causas con el porcentaje correspondiente a cada una.



Figura 4. Porcentaje de las causas por las que las estructuras probadas no cumplieron con los criterios de aceptación establecidos por la norma NMX-O-181-SCFI-2016.

La invasión de la zona de seguridad antes de iniciar la prueba es una de las causas que más veces se presentó en el no cumplimiento de los criterios, 72% de las causas de no cumplimiento (ver figura 4), siendo el 62% correspondiente a la invasión de la zona de seguridad antes de iniciar la aplicación de las cargas, esto sucede principalmente a que, en muchas ocasiones, los fabricantes que no están familiarizados con estas pruebas, y desconocen los criterios de aceptación, por lo que los tractores con las estructuras probadas son enviadas a prueba sin que se verifique su cumplimiento. Esta causa se presenta principalmente en las estructuras de protección del tipo marco de dos postes, ya que el funcionamiento de la estructura está determinado no solo por ella misma, sino que también depende de otros componentes, como es el caso del asiento del operador, o de la configuración del propio tractor en el cual están montadas, por ejemplo, la ubicación de la estructura con respecto a los demás componentes del tractor, el ancho de trocha, la distancia entre ejes o el tamaño de las ruedas.

La invasión de la zona de seguridad durante la aplicación de las cargas es una condición ocasionada principalmente por el diseño de la propia estructura, ya que los materiales, dimensiones y su forma, hacen que se invada la zona de seguridad al momento de aplicar la carga. Los materiales presentan una deformación que hacen que la zona quede desprotegida al momento de la aplicación de la carga y si esto se combina con las dimensiones y forma de la propia estructura, la situación es más crítica. Por ejemplo, una estructura con una altura muy baja y que, además, su ángulo de inclinación con respecto a la horizontal sea cercano a los 90° la hace muy susceptible a que no proteja a la zona de seguridad al momento de que suceda una volcadura.

Como se ha venido mencionando, el principal objetivo de las estructuras de protección es el de proporcionar una zona segura para el operador al momento de que se presente una volcadura, y, como también se mencionó, es la principal causa por la que las estructuras probadas no cumplen con los criterios de la norma, sin embargo, existen otros puntos de aceptación establecidos en la normatividad que definen su comportamiento:

- No debe haber miembros protuberantes o componentes que pudieran causar lesiones serias al operador durante una volcadura.
- No debe haber otros componentes que presenten un peligro serio para el operador.

Después de cada prueba se debe estar libre de grietas o roturas significativas.

En este análisis se pudo observar que durante las pruebas se presentaron fracturas durante la aplicación de las cargas que representan el 28% de las causas de no cumplimiento (ver figura 4), el 21% corresponde a la carga horizontal y el 7% a la carga lateral. Es importante hacer notar que, a pesar de que la carga lateral es en donde se requiere que la estructura de protección absorba más energía ($\text{Energía} = 1.75 * \text{Masa de referencia}$), esta no es la carga en donde se presentan los mayores rechazos, siendo la carga trasera ($\text{Energía} = 1.4 * \text{Masa de referencia}$), en donde principalmente se presenta esta condición.

Esta causa está relacionada directamente con el diseño y construcción de la estructura, ya que en este proceso se definen los materiales, las dimensiones y los procesos de fabricación de todos los componentes de estos dispositivos. Otro aspecto que se pudo observar durante el análisis fue el de que las estructuras con mayor probabilidad de falla son los marcos de dos postes. De todos los modelos sometidos a prueba, el 19% de estos marcos no lograron cumplir con los criterios de conformidad, mientras que las cabinas presentaron un menor porcentaje de rechazo, con solo un

12% de los modelos probados (figura 5). Esta diferencia está relacionada directamente con el diseño de las cabinas, ya que la estructura cuenta con más puntos de apoyo sobre el tractor, y además que cubre completamente la zona de seguridad del operador, por lo que su funcionamiento no depende de otros componentes del tractor, reduciendo así el riesgo de incumplimiento durante las pruebas.

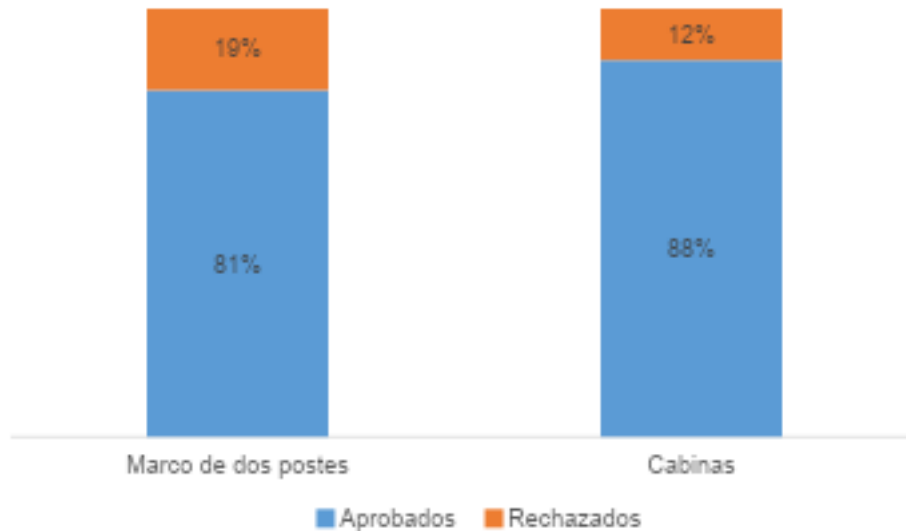


Figura 5. Porcentaje de aceptación por tipo de estructura.

Conclusiones

El análisis de los resultados de la aplicación de la norma NMX-O-181-SCFI-2016 muestran que un porcentaje importante de estructuras de protección no cumplen con sus criterios de aceptación, por lo que su uso en tractores agrícolas, compromete la seguridad de los operadores en caso de una volcadura. Es necesario que exista una normatividad obligatoria para el uso de estructuras de protección contra volcaduras en tractores agrícolas, que reduzca el riesgo para los operadores de estos equipos, al utilizar estructuras que no cumplan con el objetivo principal de mantener una zona segura al momento de que se presente un accidente de este tipo.

Las principales deficiencias identificadas están relacionadas con el diseño estructural, la calidad de los materiales empleados y con su ubicación con relación a los otros componentes del tractor en donde se encuentran montadas. Por lo que es importante que los fabricantes de tractores consideren, dentro los parámetros de entrada en el proceso de diseño, los criterios de aceptación establecidos en la normatividad. Como se ha mencionado, el riesgo de que se presenten lesiones en los operadores en el caso de que se presente una volcadura, no solo depende de las estructuras de protección aprobadas, también depende del uso del cinturón de seguridad que mantiene al operador dentro de la zona de seguridad, por lo que es importante que se concientice a los usuarios de su utilización. Este estudio contribuye a destacar el valor de la seguridad en la operación de tractores agrícolas, y resalta la importancia de la aplicación obligatoria en México de normativas para reducir la incidencia de accidentes ocasionados por la utilización de este tipo de equipos. Los tractores agrícolas permiten potenciar la producción agrícola, pero, al mismo tiempo, aumentan los riesgos de accidentes y enfermedades laborales para los operarios por el uso inadecuado de estos equipos.

Referencias bibliográficas

Revistas Científicas

Cole, H., Myers, M., y Westneat, S. (2016). Chores at times of fatal or serious injuries associated with tractor overturns with and without rollover protection. *Safety*, 2(3), 18. <https://doi.org/10.3390/safety2030018>

Galli, L. (2022). Farm tractor drivers' safety. *Mondo Macchina / Machinery World*, (11), 142–149.

Reynolds, S., y Groves, W. (2000). Effectiveness of roll-over protective structures in reducing farm tractor fatalities. *American Journal of Preventive Medicine*, 18(3), 63–69. [https://doi.org/10.1016/S0749-3797\(00\)00142-2](https://doi.org/10.1016/S0749-3797(00)00142-2)

Normas Técnicas y Regulaciones

Secretaría de Economía [SE]. (2019). *Tractor agrícola-Cabinas y marcos de protección de tractores agrícolas y forestales-Especificaciones y método de prueba* (NMX-O-181-SCFI-2016). Secretaría de Economía.

Secretaría del Trabajo y Previsión Social [STPS]. (2002). *Actividades agrícolas-Instalaciones, maquinaria, equipo y herramientas-Condiciones de seguridad* (NOM-007-STPS-2000). Secretaría del Trabajo y Previsión Social.

Informes Institucionales y Publicaciones Técnicas

García-Ramos, F., Val-Agüasca, J., Martín-Ramos, P., Videgain-Marco, M., Boné-Garasa, A., Vidal-Cortés, M., Mangado, J., Jarén, C., Arnal, P., López-Maestresalas, A., Pérez-Roncal, C., y Arazuri, S. (2020). *Siniestralidad, mortalidad agrícola, vuelcos de tractores e incendios en cosechadoras 2010-2019*. Fundación MAPFRE.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2004). *Estructuras de protección para tractores agrícolas*. Gobierno de España. https://www.mapa.gob.es/dam/mapa/contenido/agricultura/temas/medios-de-produccion/maquinaria-agricola/estudios-y-publicaciones/estructuras_proteccion.pdf

Oregon OSHA. (2025). *Proteger a los trabajadores agrícolas de Oregon de los peligros en los tractores* [Hoja informativa]. Oregon OSHA.

Páginas Electrónicas y Portales Web

Consejo Colombiano de Seguridad. (2024). *Seguridad en el manejo de tractores agrícolas*. <https://ccs.org.co/seguridad-en-el-manejo-de-tractores-agricolas/>

UCOGA Correduría de Seguros. (2023). *La siniestralidad muda del tractor*. UCOGA.

Modelo físico-matemático con inteligencia artificial para optimizar el uso de agua en parcelas agrícolas

Marlio Bedoya Cardoso¹, Jorge Eliecer Martínez Gaitán², Irlesa Indira Sánchez Medina³

Resumen

La programación eficiente del riego exige integrar la demanda atmosférica, el estado hídrico del suelo y las características del cultivo en decisiones oportunas. El objetivo de este estudio fue desarrollar y evaluar, mediante simulación reproducible, un modelo físico-matemático con inteligencia artificial para estimar dosis de riego en parcelas agrícolas. Se simularon 12 parcelas durante 120 días, para un total de 1,440 observaciones diarias con variables climáticas, edáficas, fenológicas e hidráulicas. La evapotranspiración de referencia se calculó con Hargreaves-Samani, la evapotranspiración del cultivo mediante el enfoque Kc-ET₀ y la dosis de referencia a partir de un balance hídrico de la zona radicular. Posteriormente se entrenaron una regresión Ridge y una red neuronal artificial multicapa de arquitectura 16-64-32-1. La red neuronal obtuvo MAE = 0.1376 mm, RMSE = 0.3087 mm y R² = 0.9897, mientras Ridge alcanzó MAE = 1.5579 mm, RMSE = 2.0081 mm y R² = 0.5651. La estrategia basada en inteligencia artificial aplicó 2,369.55 mm de agua acumulada, valor cercano a la referencia físico-matemática de 2,340.67 mm y 56.42 % inferior a la estrategia convencional de 5,437.74 mm. Los resultados respaldan la viabilidad de un enfoque híbrido, transparente y reproducible; sin embargo, constituyen una prueba de concepto *in silico* que requiere calibración y validación con sensores, suelos, cultivos y rendimientos reales.

Palabras clave: agricultura sostenible, balance hídrico, evapotranspiración, programación del riego, redes neuronales, uso eficiente del agua.

Abstract

Efficient irrigation scheduling requires the integration of atmospheric demand, soil water status, and crop characteristics into timely decisions. This study aimed to develop and evaluate, through reproducible simulation, a physically based artificial intelligence model for estimating irrigation depths in agricultural plots. Twelve plots were simulated over 120 days, generating 1,440 daily observations with climatic, edaphic, phenological, and hydraulic variables. Reference evapotranspiration was calculated using the Hargreaves-Samani equation, crop evapotranspiration through the Kc-ET₀ approach, and the reference irrigation depth from a root-zone water balance. A Ridge regression model and a 16-64-32-1 multilayer artificial neural network were then trained. The neural network achieved MAE = 0.1376 mm, RMSE = 0.3087 mm, and R² = 0.9897, whereas Ridge obtained MAE = 1.5579 mm, RMSE = 2.0081 mm, and R² = 0.5651. The AI-based strategy applied 2,369.55 mm of accumulated water, close to the physical-mathematical reference of 2,340.67 mm and 56.42% below the conventional strategy of 5,437.74 mm. The findings support the feasibility of a transparent and reproducible hybrid approach; nevertheless, they represent an *in silico* proof of concept requiring calibration and validation with real sensors, soils, crops, and yield data.

Keywords: artificial intelligence, crop evapotranspiration, irrigation scheduling, neural networks,

1 Universidad Surcolombiana. Correo: marlio.bedoya@usco.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8866-9830>

2 Universidad Surcolombiana. Correo: jorgeeliecer.martinez@usco.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1454-4087>

3 Universidad de Santander. Correo: irlesa.sanchez@mail.udes.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8840-0708>

soil-water balance, water-use efficiency.

Introducción

La gestión del agua en la agricultura es un componente crítico de la seguridad alimentaria y de la sostenibilidad ambiental. A escala global, el sector agrícola concentra aproximadamente 69 % de las extracciones de agua dulce en el planeta, lo que incrementa la necesidad de mejorar la productividad hídrica y reducir aplicaciones innecesarias, especialmente en escenarios de variabilidad climática y competencia entre usos (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], s. f.; UNESCO World Water Assessment Programme [UNESCO WWAP], 2024). La programación convencional del riego suele apoyarse en calendarios fijos, dosis uniformes o experiencia local. Aunque estas prácticas pueden ser operativamente simples, no siempre representan la interacción diaria entre precipitación, evapotranspiración, humedad disponible, textura del suelo, etapa fenológica y eficiencia del sistema. El enfoque FAO-56 ofrece una base estandarizada para calcular la evapotranspiración de referencia y del cultivo, mientras que métodos basados en temperatura y radiación, como Hargreaves-Samani, permiten trabajar cuando la información meteorológica es limitada (Allen et al., 1998; Hargreaves & Samani, 1985; Pereira et al., 2015; Bedoya et al., 2024).

Los modelos de balance hídrico aportan trazabilidad porque expresan las entradas, salidas y límites de almacenamiento de la zona radicular. AquaCrop y otros modelos de respuesta del cultivo al agua demuestran que la representación explícita de procesos edáficos y fisiológicos es esencial para interpretar el déficit hídrico y diseñar estrategias de manejo (Hsiao et al., 2009; Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009).

La inteligencia artificial amplía estas capacidades al aprender relaciones multivariadas y no lineales entre clima, suelo, cultivo y riego. Las revisiones especializadas reportan un uso creciente de redes neuronales artificiales, aprendizaje automático y sensores para la gestión de riego y la estimación de evapotranspiración (Alvim et al., 2022; Amani & Shafizadeh-Moghadam, 2023; Bedoya et al., 2024). No obstante, un modelo con alto desempeño estadístico puede generar decisiones agrónomicamente inconsistentes si se entrena sin restricciones físicas o sin una referencia técnica interpretable.

A partir de esta problemática se formuló la pregunta: ¿cómo integrar un balance hídrico físico-matemático y modelos de inteligencia artificial para estimar dosis de riego eficientes, reproducibles y comprensibles? El objetivo fue desarrollar y evaluar una arquitectura híbrida que generara una dosis de referencia mediante principios agronómicos, entrenara modelos Ridge y una red neuronal artificial multicapas, y comparara la aplicación acumulada de agua frente a una estrategia convencional. La hipótesis estableció que una red neuronal entrenada con etiquetas derivadas del balance hídrico podría aproximar la regla física con menor error que una línea base lineal y conservar una aplicación de agua cercana a la referencia.

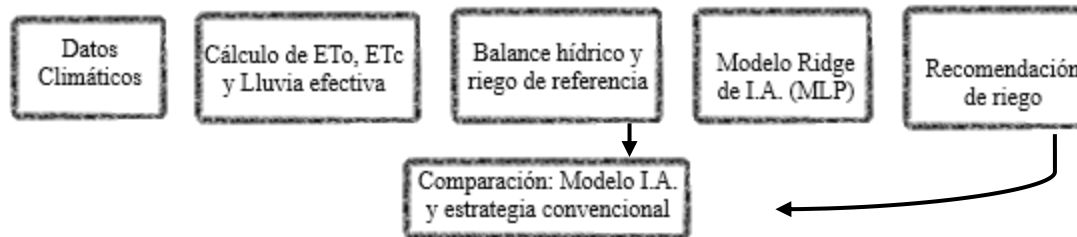
Materiales y Métodos

Se desarrolló una investigación cuantitativa de modelación aplicada. La unidad de análisis fue el registro diario de una parcela virtual durante un ciclo de 120 días. Se simularon 12 parcelas, para un total de 1,440 observaciones. El estudio no involucró participantes humanos, animales ni datos personales; su propósito fue evaluar la coherencia computacional de la arquitectura antes de una validación agronómica en campo.

El procedimiento se organizó en cinco componentes: generación del escenario agroclimático,

cálculo de evapotranspiración y lluvia efectiva, actualización del balance hídrico, entrenamiento de los modelos de inteligencia artificial y comparación de estrategias de riego. La arquitectura funcional se presenta en la Figura 1.

Figura 1. Arquitectura funcional del modelo híbrido para optimización del riego.



Fuente: elaboración propia.

Diseño de la simulación

Cada registro incluyó temperatura mínima, máxima y media, humedad relativa, velocidad del viento, radiación extraterrestre aproximada, precipitación, coeficiente de cultivo, evapotranspiración de referencia, evapotranspiración del cultivo, lluvia efectiva, humedad disponible del suelo y dosis óptima de riego. Las trayectorias incorporaron variación diaria, diferencias entre parcelas y eventos de precipitación, evitando secuencias completamente deterministas.

Cuadro 1. Variables principales del sistema de modelación.

Variable	Unidad	Función en el modelo
Temperatura mínima, máxima y media	°C	Estimación de ET_0 y caracterización climática.
Humedad relativa	%	Contexto atmosférico y variabilidad climática.
Velocidad del viento	$m\ s^{-1}$	Entrada climática complementaria.
Radiación extraterrestre aproximada	$mm\ día^{-1}$ equivalente	Cálculo simplificado de ET_0 .
Precipitación y lluvia efectiva	Mm	Entrada del balance hídrico.
Coeficiente de cultivo (K_c)	Adimensional	Conversión de ET_0 en ET_c .
Humedad disponible del suelo	Mm	Estado hídrico de la zona radicular.
Textura, pendiente y cobertura	Índices	Variabilidad edáfica y operativa entre parcelas.
Riego óptimo	Mm	Variable objetivo generada por la regla física.

Fuente: elaboración propia.

Formulación físico-matemática

La evapotranspiración de referencia se estimó mediante Hargreaves-Samani (Ecuación 1), alternativa apropiada para escenarios con disponibilidad limitada de variables meteorológicas (Hargreaves & Samani, 1985). La evapotranspiración del cultivo se obtuvo con la ecuación 2, la cual emplea el enfoque K_c-ET_0 de FAO-56 (Allen et al., 1998):

$$ET_0 = 0.023 * R_a * (T_{med} + 17.8) * \sqrt{T_{max} - T_{min}} \quad (1)$$

$$ET_c = K_c * ET_o \quad (2)$$

Dónde: ET_o = Evapotranspiración de referencia; (mm/día); R_a = radiación extraterrestre (mm/día); T_{med} = temperatura media; T_{max} = temperatura máxima; T_{min} = temperatura mínima (grados Celsius); ET_c = Evapotranspiración del cultivo; K_c = Coeficiente de cultivo (Adimensional)

Por otra parte, la lluvia efectiva (mm) se representó mediante una función por tramos que reduce el aporte útil cuando la precipitación es elevada, con el fin de aproximar pérdidas por escorrentía y percolación, empleando la Ecuación 3 y 4:

$$P_e = 0.80P; \text{ si } P \leq 25 \quad (3)$$

$$P_e = 20 + 0.4 * (P - 25); \text{ si } P > 25 \quad (4)$$

Dónde: P_e = precipitación efectiva; (mm); P = Precipitación (mm).

El almacenamiento diario de agua en la zona radicular (Ecuación 5) se actualizó entre el punto de marchitez permanente y la capacidad de campo. La dosis de riego (Ecuación 6) se activó cuando el estado proyectado descendía por debajo del umbral operativo:

$$S_t = \min(CC, \max(PMP, S_{t-1} + P_e + \eta \cdot I - ET_c)) \quad (5)$$

$$P = \max[0, \text{umbral} - S_t + P_e - ET_c] / \eta \quad (6)$$

Dónde: S_t = Agua disponible en el suelo al final del día (mm); S_{t-1} = Agua disponible en el suelo al inicio del día (mm); CC = Capacidad de campo; PMP = Punto de marchitez permanente; η = Eficiencia de aplicación del agua (0.85); P = lámina de agua aplicada por riego (mm); umbral = Nivel de agua en el suelo que activa el riego (mm).

Por ejemplo, en el escenario base se fijaron $CC = 120$ mm, $PMP = 45$ mm, $\text{umbral de riego} = 72$ mm (64% humedad disponible) y eficiencia de aplicación $\eta = 0.85$. Estos parámetros permitieron verificar la arquitectura y no deben interpretarse como valores universales para todos los suelos o cultivos.

Modelos de inteligencia artificial

La variable objetivo fue la dosis de riego calculada por el módulo físico-matemático. Las 16 variables predictoras fueron estandarizadas y el conjunto se dividió en 75 % para entrenamiento y 25 % para prueba. Se comparó una regresión Ridge, seleccionada como línea base interpretable y regularizada, con una red neuronal artificial multicapa (MLP), elegida por su capacidad para modelar interacciones no lineales (Goodfellow et al., 2016; Hastie et al., 2009).

Cuadro 2. Modelos y función dentro de la arquitectura.

Componente	Configuración	Objetivo
Regresión Ridge	Modelo lineal con penalización L2.	Establecer una línea base interpretable y controlar colinealidad.
Red neuronal MLP	16-64-32-1; activación ReLU; optimizador Adam.	Aprender relaciones no lineales entre clima, suelo, cultivo y riego.
Simulación comparativa	Referencia física, predicción MLP y riego convencional.	Cuantificar cercanía al balance y ahorro potencial de agua.

Fuente: elaboración propia.

Se realizó la regresión Ridge aplicando la Ecuación 7, minimizando el error cuadrático más una penalización $\alpha\|\beta\|^2$. La red (MLP) utilizó dos capas ocultas de 64 y 32 neuronas con activación ReLU y una salida lineal. El entrenamiento se realizó con Adam, método de optimización adaptativa ampliamente utilizado en redes profundas (Kingma & Ba, 2015). Los modelos empleados en este trabajo fueron construidos en el programa Python.

$$\hat{Y} = \beta_0 + \sum \beta_j X_j \quad (7)$$

Evaluación de los modelos

El desempeño se evaluó mediante la ecuación 8 de error absoluto medio (MAE), raíz del error cuadrático medio (RMSE) con la ecuación 9 y coeficiente de determinación (R^2) con la ecuación 10. Las métricas se complementaron con gráficos observado-predicho, residuales, mapas de calor y comparación acumulada del agua aplicada. El flujo se implementó en Python con NumPy, pandas, matplotlib y scikit-learn; este último proporciona implementaciones reproducibles de regresión, preprocesamiento y redes multicapa (Pedregosa et al., 2011).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (8)$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}}{n} \quad (9)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (10)$$

Resultados y Discusión

Comportamiento hídrico del escenario simulado

El conjunto final estuvo compuesto por 1,440 observaciones. La temperatura media simulada fue 25.50 °C, la ETo media alcanzó 5.30 mm día⁻¹ y la ETc media 4.44 mm día⁻¹. La humedad disponible del suelo presentó un promedio de 85.46 mm y el riego óptimo medio fue 1.63 mm día⁻¹

como se muestra en la Cuadro 3.

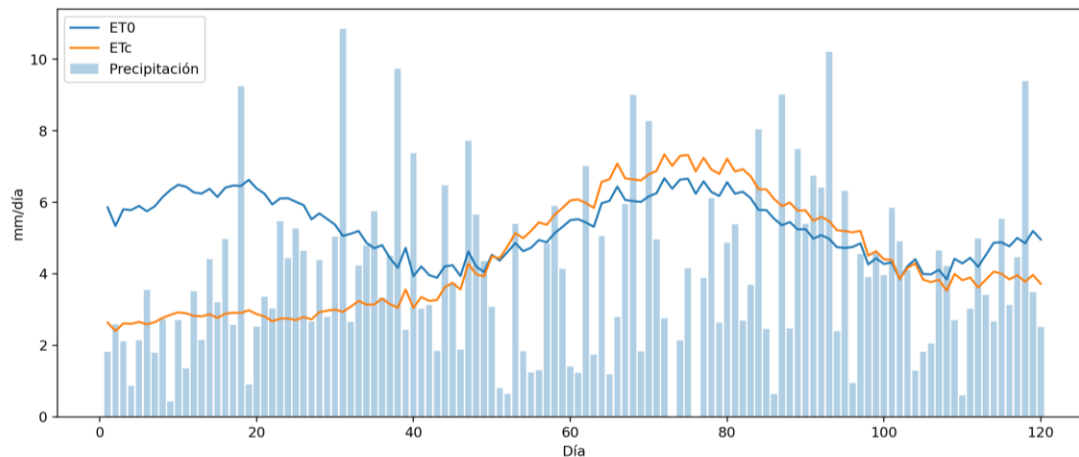
Cuadro 3. Resumen descriptivo del experimento simulado.

Indicador	Valor	Interpretación
Observaciones	1,440	12 parcelas $\times$ 120 días.
ET ₀ media	5.30 mm día ⁻¹	Demanda atmosférica promedio.
ET _c media	4.44 mm día ⁻¹	Demanda hídrica del cultivo.
Humedad del suelo media	85.46 mm	Estado hídrico promedio.
Riego óptimo medio	1.63 mm día ⁻¹	Dosis diaria de referencia.
Precipitación media	3.90 mm día ⁻¹	Entrada climática promedio.

Fuente: elaboración propia a partir del conjunto simulado.

La Figura 2 las tres variables más importantes en la programación de riego, así mismo, se evidencia que ET_c siguió la dinámica de ET₀ modulada por K_c. Indicando que al inicio y al final del ciclo la Evaporación de referencia (ET₀) es mayor que la Evapotranspiración del cultivo (ET_c) Por otra parte, las precipitaciones redujeron la necesidad de riego en días específicos, aunque no sustituyeron la reposición cuando el almacenamiento del suelo se aproximó al umbral.

Figura 2. Comportamiento promedio de ET₀, ET_c y precipitación durante el periodo simulado.



Fuente: elaboración propia.

Desempeño predictivo

La regresión Ridge presentó un desempeño de MAE = 1.5579 mm, RMSE = 2.0081 mm y $R^2 = 0.5651$. Aunque su capacidad predictiva fue inferior a la del modelo de redes neuronales artificiales (MLP), funcionó como línea base interpretable y permitió identificar las variables con mayor contribución relativa sobre la dosis de riego. Los coeficientes estandarizados indicaron que la lluvia efectiva, la ET_c, la precipitación total y la humedad del suelo fueron los predictores más influyentes (Cuadro 4); de igual forma, los signos obtenidos son coherentes con la lógica agronómica de cualquier cultivo, ya que la demanda hídrica del cultivo (ET_c) incrementó la necesidad de riego, mientras que la lluvia efectiva y una mayor humedad del suelo tendieron a reducirla.

Cuadro 4. Principales coeficientes estandarizados de la regresión Ridge.

Variable	Coeficiente
Lluvia efectiva	-2.9892
ETc	2.2367
Precipitación	2.1064
Humedad del suelo	-1.2353
Coeficiente de cultivo (Kc)	-1.1389
Temperatura máxima	-0.7818
Radiación extraterrestre	-0.7660
Temperatura mínima	0.5462

Fuente: elaboración propia a partir del ajuste de la regresión Ridge.

Comparación de Modelos

La simulación de los modelos se estructuró en tres niveles complementarios: i) el modelo físico-matemático, que generó la dosis de referencia a partir de ET₀, ET_c, lluvia efectiva y balance hídrico; ii) la regresión Ridge, que reprodujo esa regla como una aproximación lineal regularizada; y iii) la red neuronal multicapas (MLP), que aprendió la relación no lineal completa entre clima, suelo, cultivo y riego. Esta secuencia permitió comparar la interpretación de un modelo lineal con la precisión de un modelo no lineal y, posteriormente, traducir ambas salidas a una simulación operativa de estrategias de riego.

La red neuronal multicapas (MLP) superó ampliamente a Ridge en las tres medidas de bondad de ajuste con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9897, un error cuadrático medio (RMSE) de 0.3087 mm y un error absoluto medio (MAE) de 0.1376 mm (Cuadro 5), lo cual indican que la MLP reprodujo con alta fidelidad la regla físico-matemática dentro del dominio simulado. Ridge fue de gran utilidad como referencia explicativa, pero su estructura lineal fue insuficiente para representar umbrales, interacciones y respuestas por tramos.

Cuadro 5. Desempeño de los modelos evaluados.

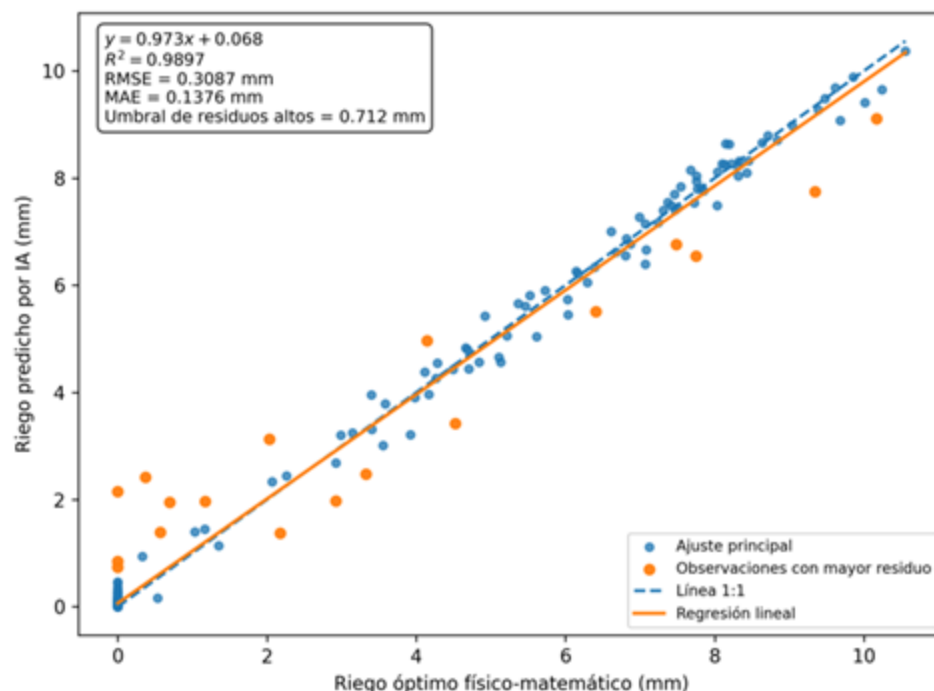
Modelo	MAE (mm)	RMSE (mm)	R^2
Regresión Ridge	1.5579	2.0081	0.5651
Red neuronal MLP	0.1376	0.3087	0.9897

Fuente: elaboración propia.

El desempeño superior de la red neuronal multicapas (MLP) refleja la naturaleza no lineal del problema. La activación del riego depende de umbrales y de la interacción entre múltiples entradas, por lo que una relación lineal regularizada no logra representar completamente los cambios abruptos entre ausencia de riego y reposición. Ridge, sin embargo, mantiene valor para auditar la dirección y magnitud de los coeficientes, mientras la MLP requiere validación, análisis de sensibilidad y vigilancia de extrapolaciones.

Por otra parte, se puede apreciar en la Figura 3, que la dispersión se concentró alrededor de la diagonal, con mayores diferencias en observaciones cercanas a cambios de estado hídrico. Esta respuesta es coherente con una variable objetivo que presenta numerosos valores próximos a cero y picos asociados con activaciones de riego.

Figura 3. Relación entre riego físico-matemático y predicción de la red neuronal MLP.



Fuente: elaboración propia.

Los resultados respaldan la integración de conocimiento físico e inteligencia artificial como una estrategia pertinente para la programación del riego. El balance hídrico conservó el papel de núcleo explicativo: definió la relación entre evapotranspiración, lluvia efectiva, almacenamiento y eficiencia de aplicación. La red neuronal actuó como emulador de esa regla, no como sustituto de los principios agronómicos. Esta complementariedad coincide con la necesidad de combinar modelos interpretables y herramientas de aprendizaje automático en la gestión agrícola del agua (Alvim et al., 2022; Amani & Shafizadeh-Moghadam, 2023).

Comparación de estrategias de riego

La estrategia basada en IA o red neuronal multicapa (MLP) aplicó 28.88 mm más que la referencia físico-matemática, una diferencia relativa de 1.23 %. Frente a la estrategia convencional, la reducción estimada fue 56.42 %. En este estudio, la estrategia convencional se definió como una aplicación equivalente a $1.15 \times ET_c$, utilizada como referencia conservadora para simular una práctica de sobre riego moderado y comparar el potencial de ahorro del enfoque híbrido.

Cuadro 6. Agua total aplicada por estrategia.

Estrategia	Agua total (mm)	Interpretación
Físico-matemática	2,340.67	Referencia derivada del balance hídrico.
IA - red neuronal MLP	2,369.55	Predicción aprendida a partir de la referencia.

Convencional	5,437.74	Aplicación equivalente a $1.15 \times \text{ETc}$.
--------------	----------	---

Fuente: elaboración propia.

La cercanía de 1.23 % entre la estrategia basada en IA con la red neuronal artificial (MLP) y la referencia sugiere que el modelo neuronal puede acelerar la recomendación cuando las variables de entrada están disponibles. El ahorro estimado de 56.42% frente a la programación convencional debe interpretarse con cautela, ya que depende de la regla convencional elegida, los parámetros de suelo, la distribución de lluvia y la eficiencia asumida. La literatura sobre riego deficitario y productividad del agua advierte que reducir aplicaciones solo es beneficioso cuando se mantiene el estado hídrico dentro de límites compatibles con el desarrollo del cultivo (Feres & Soriano, 2007; FAO, 2012).

Conclusiones

El estudio permitió estructurar un modelo híbrido que integra evapotranspiración, lluvia efectiva, balance hídrico, regresión Ridge, red neuronal MLP y simulación comparativa para estimar dosis diarias de riego.

La red neuronal multicapas (MLP) obtuvo el mejor desempeño, con MAE = 0.1376 mm, RMSE = 0.3087 mm y $R^2 = 0.9897$. La regresión Ridge presentó menor capacidad predictiva, pero aportó una línea base interpretable para examinar la influencia de las variables.

La estrategia basada en IA con red neuronal multicapas (MLP), aplicó 2,369.55 mm, permaneció a 1.23 % de la referencia físico-matemática y redujo 56.42 % el volumen frente a la estrategia convencional definida en la simulación. Estos resultados muestran potencial para apoyar decisiones hídricas adaptativas, sin constituir todavía una estimación de ahorro validada en campo.

La contribución principal es una arquitectura reproducible y auditable en la que la inteligencia artificial aprende una regla agronómica explícita. Su adopción operativa requiere calibración local, sensores confiables, ensayos con cultivos reales, evaluación de productividad del agua, análisis económico y mecanismos de control ante predicciones inseguras.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Surcolombiana y a la Universidad de Santander por el respaldo académico e institucional a los procesos de investigación aplicada en inteligencia artificial, agricultura sostenible y gestión eficiente de los recursos hídricos.

Contribución de los autores

Jorge Eliecer Martínez Gaitán: conceptualización, diseño metodológico, modelación, análisis y redacción. Marlio Bedoya Cardoso: revisión técnica, interpretación agronómica y supervisión. Irlesa Indira Sánchez Medina: revisión metodológica, análisis crítico y edición. Todos los autores revisaron y aprobaron la versión final del manuscrito.

Declaración de conflicto de intereses y disponibilidad de datos

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses. El estudio utilizó datos simulados y no involucró información personal. Para el sometimiento editorial definitivo, el conjunto de datos, el código de generación y los archivos de configuración deberán depositarse en un repositorio abierto con número de versión, licencia y documentación de ejecución.

Literatura Citada

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm>
- Alvim, S. J. T., Guimarães, C. M., de Sousa, E. F., Garcia, R. F., & Marciano, C. R. (2022). Application of artificial intelligence for irrigation management: A systematic review. *Engenharia Agrícola*, 42, e20210159. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v42nepe20210159/2022>
- Amani, S., & Shafizadeh-Moghadam, H. (2023). A review of machine learning models and influential factors for estimating evapotranspiration using remote sensing and ground-based data. *Agricultural Water Management*, 284, 108324. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108324>
- Bedoya-Cardoso, M., Martínez-Gaitán, J. E., & Sanabria Méndez, N. B. (2024). Evaluación comparativa de Métodos para evaluar la evapotranspiración en palma de aceite, mediante modelos clásicos y redes neuronales. En Libro de Actas del II Congreso Internacional USRA Ingeniería Agrícola y Carreras Afines (pp. 157-165). Eliva Press Global Ltd (part of Eliva Press S.R.L.). ISBN: 978-99993-2-189-1.
- Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147–159. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s. f.). Water use. AQUASTAT. <https://www.fao.org/aquastat/en/overview/methodology/water-use/>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2012). Crop yield response to water (FAO Irrigation and Drainage Paper 66). <https://www.fao.org/4/i2800e/i2800e00.htm>
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep learning. MIT Press. <https://www.deeplearningbook.org/>
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>
- Hsiao, T. C., Heng, L. K., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448–459. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>
- Kingma, D. P., & Ba, J. (2015). Adam: A method for stochastic optimization. *International Conference on Learning Representations*. <https://arxiv.org/abs/1412.6980>
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830. <https://www.jmlr.org/papers/v12/pedregosa11a.html>

- Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M., & Raes, D. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*, 147, 4–20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2009). AquaCrop The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3), 438–447. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426–437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- UNESCO World Water Assessment Programme. (2024). The United Nations World Water Development Report 2024: Water for prosperity and peace. UNESCO. <https://www.unesco.org/en/reports/wwdr/2024>

BIOETASURA: Bioetanol a partir de la basura orgánica del mercado municipal.

Cuitláhuac Mojica Mesinas, Heidy Lizbeth Vargas Lara, Jimena Aguilar
Velazquez, Miusseth Montoya Altamirano

Resumen

El aumento continuo de residuos vegetales en los mercados, como es el caso de Ciudad Valles, es un dolor de cabeza ambiental para todas las administraciones municipales, por la acumulación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), sino también por la enorme pérdida de recursos que bien podrían aprovecharse en la generación de energías limpias. Con esto en mente, el proyecto BIOETASURA se propuso evaluar la biomasa de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) del mercado municipal de Ciudad Valles, San Luis Potosí, para transformarla en biocombustible mediante procesos biotecnológicos.

Para lograrlo, se montó un diseño experimental multifactorial, que comenzó con la selección de la materia prima (RSU de mercado municipal), limpieza y reducción de tamaño de la materia prima, seguida de un tratamiento térmico clave para liberar los azúcares fermentables. Después, deja la fermentación alcohólica en manos de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*; la purificación del bioetanol resultante se realiza usando una columna de destilación de columna empaquetada. Al final, se mide tanto la eficiencia de todo el sistema como la calidad del destilado.

Los resultados fueron bastante claros: Se logra transformar estas mezclas RSU de origen vegetal, en un bioetanol con una concentración alcohólica que superó el 95 % v/v, recuperando un volumen equivalente al 10 % de la carga inicial. Esto demuestra que estos desechos tienen un potencial real como fuente de energía alternativa. En conclusión, aprovechar la biomasa residual es una estrategia totalmente viable desde el punto de vista técnico, abre la puerta a una gestión de materiales orgánicos mucho más sostenible y deja una base metodológica sólida para futuros desarrollos en energías renovables.

Palabras clave: Biomasa residual, biocombustible, fermentación alcohólica, economía circular, energía renovable.

1

Instituto Tecnológico De Ciudad Valles, SLP, Carretera al Ingenio Plan de Ayala Vista Hermosa, 79010 Cdad. Valles, S.L.P , cuitlahuac.mojica@tecvalles.mx, heidy.vargas@tecvalles.mx, 23690715@tecvalles.mx, 23690696@tecvalles.mx

Introducción

Desde mediados del siglo pasado, el aumento sin control de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) de origen orgánicos, se ha consolidado como uno de los desafíos ambientales más complejos a nivel global, impactando directamente la estabilidad de los ecosistemas y la salud pública. Una parte crítica de este problema se origina en la actividad comercial cotidiana, específicamente en los mercados y centrales de abasto de frutas y verduras. Es ahí donde día tras día se descartan toneladas de materiales con una altísima carga de materia biodegradable. Cuando estos desechos se dejan acumular sin un manejo adecuado, se acelera la producción de lixiviados y la generación de gases de efecto invernadero que impactan en el calentamiento del planeta; en mayor proporción metano, que es un gas altamente contaminante, lo que agrava el deterioro ecológico y acelera el cambio climático. En el contexto de México, fenómenos como el crecimiento urbano acelerado y la demanda alimentaria en constante alza han intensificado esta

problemática, saturando por completo las capacidades de los sistemas de recolección y los sitios de disposición final.

Como bien lo ha señalado la GIZ (2019) en su informe, en los mercados municipales es habitual que una enorme cantidad de frutas y verduras en mal estado, termine directamente en rellenos sanitarios o tiraderos temporales en su mayor cantidad. Esta práctica representa un gran desperdicio, pues se descartan recursos valiosos con alto potencial para revalorizarlos, que aún conservan un alto potencial energético y biotecnológico. Ante un panorama adverso, se vuelve urgente e indispensable, diseñar, implementar y gestionar estrategias reales que permitan a los municipios, transformar estos subproductos en recursos útiles dentro de un esquema de sostenibilidad amigable con el medio ambiente. Entre las alternativas con mayor viabilidad, destaca el aprovechamiento del potencial energético, a través de la producción de biocombustibles de segunda generación. En este campo, el bioetanol despierta un profundo interés tanto en el sector científico como en el industrial, debido a que puede obtenerse a partir de biomasa rica en carbohidratos (azucars y almidones) y utilizarse eficientemente como un combustible renovable o un aditivo para gasolinas.

Tal como explican Chauhan (2024), a diferencia de los combustibles fósiles provenientes del petróleo, el bioetanol reduce de forma drástica las emisiones contaminantes atmosféricos y promueve un uso de los recursos renovables disponibles de los RSU orgánicos. En particular, el desarrollo de bioetanol de segunda generación, al utilizar materias primas de desecho, como es el caso de los RSU provenientes de los mercados. Está ganando espacio al no competir con la producción de alimentos de consumo humano, ni con la seguridad alimentaria. Este enfoque permite revalorizar a los subproductos agrícolas que se generan al momento de la cosecha y RSU orgánicos generados en la cadena de consumo, mediante procesos de transformación biotecnológica bien definidos, que abarcan desde el pretratamiento y la hidrólisis, hasta la fermentación y purificación final del alcohol.

De acuerdo con Torres Villanueva et al. (2024), los residuos de frutas y verduras poseen características idóneas para estos procesos, gracias a sus altos niveles de azúcares simples, almidones y otros compuestos que se convierten fácilmente en sustratos fermentables. Bajo esta perspectiva, nace BIOETASURA, una propuesta diseñada específicamente para aprovechar los RSU orgánicos generados en el mercado municipal de Ciudad Valles, San Luis Potosí, y convertirlos en bioetanol como una alternativa energética limpia y sustentable. El proyecto articula operaciones de selección, acondicionamiento de la materia prima, seguidas de una hidrólisis térmica para liberar los azúcares disponibles. Para posteriormente realizar la fermentación alcohólica, utilizando la levadura *Saccharomyces cerevisiae* y se recurre a la destilación para purificar y recuperar el producto.

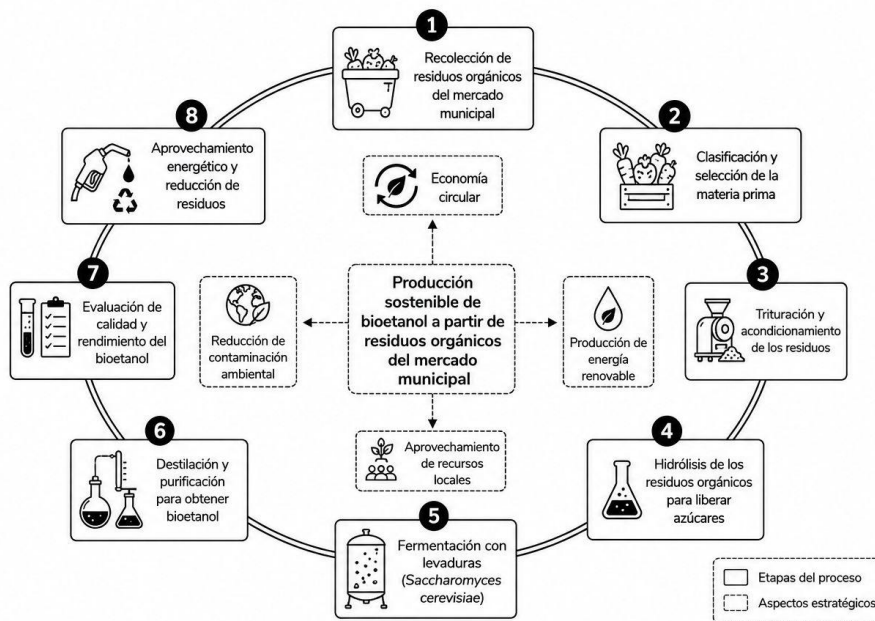


Figura 1. Etapas de la Planificación Estratégica

Más allá de la simple generación de energía, esta investigación adopta principios fundamentales de la economía circular al incorporar RSU orgánicos dentro de una cadena de valor completamente nueva, reduciendo drásticamente el volumen de basura enviado a los colapsados vertederos o rellenos sanitarios. De este modo, el estudio busca demostrar que el proceso es técnicamente viable, también aportar evidencia sólida sobre el valor de la biomasa residual como fuente alternativa de energía. Con esto, se pretende contribuir al diseño de soluciones tecnológicas sostenibles, que respondan a la realidad social actual, fortaleciendo la investigación e ingeniería aplicada dentro del área de los Alimentos.

Materiales y Métodos

Enfoque y Diseño Experimental

Esta investigación se estructuró bajo un enfoque cuantitativo y cualitativo experimental, desarrollándose por completo en el laboratorio Química del Tecnológico Nacional de México (TecNM)/Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, en el estado de San Luis Potosí, México, durante el ciclo escolar agosto-diciembre-2025/enero-junio-2026. La meta del estudio fue medir la producción de bioetanol a partir de RSU orgánicos (Frutas y verduras con alto contenido de azúcares y almidón), generados en el mercado municipal de Ciudad Valles, implementando una ruta de cuatro etapas consecutivas: Selección y acondicionamiento, hidrólisis térmica, fermentación alcohólica y una purificación final mediante bi-distilación en columna empacada. Para garantizar la reproducibilidad y el rigor estadístico de los datos obtenidos en condiciones controladas, se optó por un diseño experimental completamente aleatorizado, se realizan tres repeticiones por cada tratamiento y se promedian los resultados.

Configuración de Tratamientos y Variables

Tomando como referencia los criterios técnicos planteados por Malagón Micán (2017), los tratamientos para la fermentación alcohólica, se definieron de acuerdo con la naturaleza de la biomasa utilizada (frutas, vegetales o mezcla de ambos). De este modo, configuramos tres grupos principales de estudio: residuos con predominio de frutas (con alta carga de azúcares fermentables), residuos compuestos en su mayoría por vegetales ricos en almidón, y finalmente, una mezcla equilibrada que combinaba ambos tipos de RSU orgánicos. Cada sistema independiente de fermentación funcionó como una unidad experimental aislada. Dentro de este esquema, definimos la composición del residuo orgánico como nuestra variable independiente, mientras que las variables dependientes medidas fueron el rendimiento final en la producción de bioetanol medida como concentración alcohólica (% v/v). Durante todo el proceso, variables críticas como el pH del mosto en fermentación, el tiempo en el cual las levaduras están más activas, la temperatura controlada de fermentación y la relación inicial inoculación de la levadura (un gramo de levadura por cada litro de mosto) se mantuvieron bajo control operativo.

Materias Primas, Reactivos e Instrumentación

Siguiendo la metodología similar a la descrita por Ruiz Barazorda (2024), recolectamos los residuos orgánicos directamente en los diferentes locales comerciales del mercado municipal de Ciudad Valles, dedicados a la venta de frutas, verduras y hortalizas. Para el estudio seleccionamos aquellas materias primas con un perfil de carbohidratos ideal para la fermentación: papa (*Solanum tuberosum*), plátano (*Musa paradisiaca*), piña (*Ananas comosus*), mango (*Mangifera indica*), jícama (*Pachyrhizus erosus*) y chayote (*Sechium edule*) y se excluyeron las hortalizas. La bioconversión se dejó a cargo de la levadura convencional *Saccharomyces cerevisiae*. En cuanto a los insumos químicos, empleamos agua destilada, soluciones reguladoras de pH con grado analítico (Merck®, Alemania) y nutrientes específicos para potenciar el crecimiento microbiano. El monitoreo y la preparación de las muestras requirieron una infraestructura de laboratorio bien definida: una balanza analítica (OHAUS®, EE. UU.), un potenciómetro digital (Hanna Instruments®, Rumania), un termómetro digital (Testo®, Alemania) y una parrilla equipada con agitación magnética (IKA®, Alemania). El procesamiento del volumen se realizó en material de vidrio de borosilicato (Pyrex®, EE. UU.) y en un sistema de fermentación tipo biorreactor con una capacidad de 20 litros de polietileno de alta densidad (HDPE), evaluando el destilado con un alcoholímetro graduado (Alla France®, Francia). Todas las lecturas y registros se estandarizaron bajo el Sistema Internacional de Unidades.

Procedimiento Operativo e Hidrólisis

El trabajo de campo inició con la recolección de la materia prima, el descarte manual de materiales ajenos a la investigación (Frutas de bajo contenido de azúcares fermentables, verduras de bajo contenido de almidones y hortalizas) y la eliminación de fracciones vegetales con un estado avanzado de descomposición. Tras esta selección, se lavaron las muestras con agua potable para eliminar las impurezas de la superficie y se redujo de tamaño mecánicamente, hasta lograr una pasta homogénea de granulometría uniforme; este acondicionamiento previo, es un paso clave para optimizar la transferencia de calor y facilitar la fractura térmica, para la obtención de los compuestos fermentables de la biomasa. Siguiendo las recomendaciones de Díaz (2015), sometimos la mezcla homogeneizada a un proceso de hidrólisis térmica. El propósito de este paso fue romper de forma parcial las estructuras celulares complejas y liberar los azúcares que se encuentran atrapados en los almidones y polisacáridos de los vegetales. Llevamos a cabo este calentamiento bajo un control estricto de temperatura, hasta conseguir una suspensión fluida. Al concluir la hidrólisis, dejamos enfriar la mezcla hasta los niveles óptimos para el microorganismo, ajustamos el pH en un rango de 4.0 a 5.0 e inoculamos la suspensión con la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. Esta fermentación se desarrolló en un entorno anaerobio estricto, manteniendo el sistema a $25 \pm 2^\circ\text{C}$ durante un periodo de 28 días, tiempo durante el cual se monitorearon las condiciones de forma periódica (dos veces a día), para asegurar la estabilidad del sistema y maximizar la transformación de los azúcares en etanol.

Destilación y Análisis Estadístico

En consonancia con los métodos de destilación de Aurora y Barrera (2015), una vez finalizado el ciclo de fermentación, se transfiere el fermentado a una columna de destilación de cobre, empaquetada con cuentas de vidrio de 6 milímetros, de 1.10 metros de altura y un diámetro de una pulgada para separar y concentrar el etanol (bi-destilación). Elegimos este sistema en lugar de la destilación simple debido a su alta eficiencia, sus ciclos internos de evaporación y condensación repetitiva (flujo ascendente de vapor y flujo descendente de líquido), permiten elevar la pureza del destilado. El producto recuperado se analizó con un alcoholímetro graduado para registrar tanto la concentración volumétrica final (% v/v) como el rendimiento neto respecto al volumen de fermento cargado al inicio de la destilación. Todos los datos recolectados se organizaron en bitácoras para su procesamiento estadístico. Se calcula las medias aritméticas y las desviaciones estándar para dimensionar la variabilidad real entre los diferentes tratamientos. Para la validación y comparación de las hipótesis, se define un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, lo que equivale a un margen de error del 5%, proporcionando la certeza matemática necesaria para validar la consistencia del experimento y la reproducibilidad de los resultados.

Resultados y discusión

Al realizar el la experimentación, se logra transformar la biomasa residual, provenientes de los RSU orgánicos de los mercados municipales de Ciudad Valles, en un biocombustible líquido con un rendimiento neto del 10 % respecto al mosto original y una concentración alcohólica que, tras pasar por una bi-destilación, superó el 95 % v/v. Estas cifras son un indicativo de que los residuos de los mercados municipales, tienen un perfil ideal para ser aprovechados mediante herramientas biotecnológicas y métodos de separación física. Este éxito, se debe a la sinergia de cada etapa del diseño. Por ejemplo, el tratamiento térmico inicial fue crucial: al reducir de tamaño las fibras complejas de los vegetales, se dejó a los compuestos fermentables totalmente expuestos para el ataque biológico de las levaduras. Después, la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, realiza la parte metabólica, bajo los parámetros de cultivo que se fijaron, convirtiendo eficientemente esa carga azucarada en bioetanol (alcohol etílico). El toque final lo dio la bi-destilación en columna empaquetada, un sistema que elevó la pureza del destilado, gracias a sus ciclos internos y consecutivos de evaporación y condensación.

En concordancia con lo expuesto por García, López y Hernández (2019), estos resultados confirman que, los RSU orgánicos provenientes de los locales comerciales de los mercados municipales, posee un potencial real para la diversificación de los biocombustibles en México. Un 10 % de recuperación de bioetanol por cada carga de mosto, deja margen de mejora, si se le compara con los rendimientos de la gran industria; sin embargo, obtener estos resultados a escala de laboratorio, demuestra que el proceso genera un producto funcional y con expectativas de escalamiento. Además, alcanzar purezas mayor o iguales al 95 % es un indicador de rendimiento excelente, sobre todo si recordamos que la meta del proyecto, es validar el aprovechamiento energético de estos desechos y no competir con la producción comercial de etanol anhidro.

Este escenario, se alinea perfectamente con las observaciones realizadas por Cabrera Castillo, Vidal Robles y Bañuelos Romero (2025) en sus trabajos sobre valorización de biomasa residual. Como apuntan los autores, factores como la naturaleza del sustrato, el rigor en las variables operativas y el tipo de destilación, determinan directamente la calidad del bioetanol. Más allá de los números, el verdadero valor del estudio radica en su impacto ambiental. Al demostrar que lo que comúnmente se tira y pudre en los contenedores de RSU orgánicos en los mercados municipales, puede regresar a la cadena productiva con una revalorización real. Convertir basura vegetal en combustible limpio, reduce la presión sobre los saturados vertederos o rellenos sanitarios de los municipios y coloca sobre la mesa un modelo viable de economía circular para la ciudad y la región.

Si comparamos estos resultados con la hipótesis que se formula al inicio de la investigación, podemos decir, que los datos obtenidos cumplen con lo esperado. Se comprobó en el laboratorio de Química del TecNM/Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, que RSU orgánicos de frutas y verduras son una fuente de energía latente, si se les aplica el tratamiento biotecnológico correcto. El hecho de obtener un destilado de tan alta concentración valida el diseño experimental y consolida la estrategia como una alternativa sustentable para el entorno local y regional. Aun así, hay que ser conscientes de que quedan pendientes por optimizar en el proceso, especialmente en lo tocante a los tiempos de procesamiento, el balance de nutrientes en el medio fermentativo, las proporciones de las materias primas y la eficiencia de arrastre en la bi-distilación. Ajustar con precisión estas condiciones operativas, elevará la productividad global, y también asentará bases más firmes para el futuro aprovechamiento energético de los residuos orgánicos en toda la región Huasteca.

Conclusiones

La investigación, aportó evidencia científica sólida sobre el verdadero potencial de los RSU orgánicos de frutas y hortalizas como materia prima para generar bioetanol mediante procesos biotecnológicos controlados. Al final, los hallazgos confirman que esta biomasa residual posee las propiedades fisicoquímicas idóneas para su aprovechamiento energético, lo que amplía el conocimiento disponible sobre cómo dar valor a RSU orgánicos en entornos urbanos y agroalimentarios. La mayor aportación del estudio radica en haber validado de forma experimental una estrategia integral para recuperar RSU orgánicos de los mercados municipales, demostrando con que estos materiales pueden entrar a los esquemas de producción de biocombustibles de segunda generación, evitando además el uso de recursos agrícolas destinados al consumo humano. Como resultado, se entrega información para el diseño de tecnologías enfocadas en el manejo sostenible de los RSU orgánicos que provienen de los mercados municipales, para apoyar los modelos reales de economía circular dentro del sector energético. Se Logra establecer una metodología reproducible (pretratamiento, hidrólisis térmica, fermentación alcohólica con *Saccharomyces cerevisiae* y bi-distilación) que sirve como referencia, para quienes busquen optimizar la conversión de biomasa residual generada en los mercados municipales para el futuro.

La ventaja de este procedimiento experimental, es que puede adaptarse con facilidad a diferentes tipos de residuos orgánicos con perfiles similares, generando conocimiento útil tanto a nivel local, regional y nacional. Desde una mirada científica y tecnológica, el estudio amplía la comprensión sobre cómo entrelazar la gestión de los residuos sólidos urbanos (RSU) con la generación de energías limpias; es claro que es viable transformar lo que comúnmente se considera basura en recursos con un alto valor agregado. El aporte de la investigación, se vuelve crucial para diseñar estrategias sustentables, que alivien la presión que sufren los sistemas tradicionales de disposición final de los RSU orgánicos, promoviendo al mismo tiempo, un uso mucho más inteligente de los recursos disponibles de la ciudad y región.

En este sentido, y como concluye Arellano (2021), los resultados obtenidos robustecen las líneas de investigación dedicadas a los biocombustibles de segunda generación, aportando resultados específicos sobre cómo se comportan las mezclas de residuos vegetales, al usarse como sustrato fermentable. Esta evidencia, funciona como un referencia para consolidar alternativas energéticas renovables apoyadas en recursos locales, facilitando el desarrollo de proyectos que enlacen de forma equilibrada criterios ambientales, energéticos y productivos bajo un modelo de revalorización.

En conclusión, los resultados de la investigación, colocan en la discusión, las bases científicas y técnicas indispensables para el diseño de futuras estrategias de transformación de residuos sólidos urbanos (RSU orgánicos). Demostrando que los procesos biotecnológicos, son una solución teórica, y una alternativa real;

de gran viabilidad para la producción de biocombustibles para el aprovechamiento integral de la biomasa residual provenientes de los mercados municipales. Con esto, se amplía el mapa del conocimiento sobre la conversión de subproductos agroalimentarios en vectores energéticos de alto interés, acelerando la transición hacia soluciones sustentables y empujando sistemas de producción y consumo que sean de verdad eficientes y responsables con el entorno.

Referencias

Revistas:

Aurora, E., & Barrera, E. (2015). Obtención de bioetanol a partir de los residuos fermentables de mango y determinación de parámetros óptimos de destilación. *Revista Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 2(2), 31–40.

Cabrera Castillo, R. A., Vidal Robles, E., & Bañuelos Romero, F. (2025). Producción de bioetanol a partir de residuos agroindustriales con potencial uso como combustible sólido. *RD-ICUAP*, 11(31), 1574. <https://doi.org/10.32399/icuap.rdic.2448-5829.2025.31.1574>.

Cardona, C., Julián, O., Montoya, M., & Quintero, J. (2005). Simulación de los procesos de obtención de etanol a partir de caña de azúcar y maíz. *Scientia et Technica*, (28), 187–192.

Chauhan, S. J., Patel, B., Devliya, B., Solanki, H., & Patel, H. D. (2024). Recent advancement in production of bioethanol from waste biomass: A review. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26, 3739–3759. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02819-3>.

García, J., López, M., & Hernández, R. (2019). Evaluación de la pureza del bioetanol para aplicaciones energéticas. *Revista de Energías Renovables*, 12(3), 45–58.

González Andrade, S., & Brugués Rodríguez, A. (2010). Producción de biocombustibles con maíz: un análisis de bienestar en México. *Ra Ximhai*, 6(1), 73–85. <https://doi.org/10.35197/rx.06.01.2010.11.sg>.

Malagón Micán, M. L., Páez, A. I., Santos Aguilar, J., Zabala García, D., & Lache Muñoz, A. (2017). Producción de bioetanol a partir de diferentes mezclas de los residuos orgánicos generados en una empresa de alimentos. *Revista de Investigación*, 10(1). <https://doi.org/10.29097/2011-639X.65>.

Ruiz Barazorda, Y., Chauca Montesinos, S., Soto Carrión, C., & Salas Peña, V. (2024). Producción de bioetanol a partir de residuos de naranja (*Citrus sinensis*) y plátano (*Musa paradisiaca* L.). *Revista de Investigación Hatun Yachay Wasi*, 4(1), 109–117. <https://doi.org/10.57107/hyw.v4i1.90>.

Torres Villanueva, I., Nava Hernández, C. V., González Sánchez, A., Bárcenas Grangeno, M. C., González Guerra, G. M., & Gómez Castro, F. I. (2024). Producción de bioetanol y de ácido cítrico a partir de residuos de frutas y vegetales. *Jóvenes en la Ciencia*, 28. <https://doi.org/10.15174/jc.2024.4285>.

Tesis

Álvarez Maciel, C. (2018). Producción de etanol como biocombustible a partir de residuos vegetales no alimenticios (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Arellano Romero, W. C. (2021). Obtención de bioetanol a partir de los residuos sólidos orgánicos del mercado de abasto de la municipalidad distrital de Huacho (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Perú.

Díaz, A. (2015). Hidrólisis de residuos de la venta de verduras y hortalizas para la producción de bioetanol (Tesis de maestría). Universidad de Oviedo, Oviedo, España.

Flores Martínez, A. C. (2025). Obtención de bioetanol utilizando digestatos de FORSU y biomasa microalgal (Tesis). Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Referencia electrónica

GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit). (2019). Evaluación del impacto ambiental y social del proyecto: Manejo y aprovechamiento de residuos orgánicos mediante valorización energética en el municipio de Naucalpan, Estado de México. Sitio Web GIZ, [Documento electrónico], Eschborn, Alemania, disponible en: <https://www.giz.de> [Fecha de acceso: 16 de junio de 2026].

Estudio de una Planta Agroindustrial Procesadora de Aceite de Oliva en la Provincia de Sevilla España

Guerra-Cruz Ximena Priscila, Reyna-Izaguirre Diana América, Szymanski-Duque Rosa Guadalupe, Márquez-Berber Sergio Roberto.

Resumen

El aceite de oliva constituye un producto emblemático de la dieta mediterránea y un pilar económico en Andalucía, España. Este estudio tiene como objetivo analizar el proceso de elaboración en una planta procesadora de aceite de oliva virgen extra, desde la recepción de la materia prima hasta la obtención del producto final, incluyendo aquellas operaciones y controles que aseguren la calidad y autenticidad del producto final, en la empresa “Oleoestepa, S.C.A.” en España. Se observan aspectos básicos del sector del AOVE y del cultivo del olivo, así como los controles de calidad y procesos en laboratorio. Dicha investigación se justifica por la creciente importancia del sector oleícola en la estructura agroalimentaria española y su capacidad de tener una industria altamente competente para garantizar productos de excelente calidad. La metodología empleada fue cualitativa, basada en observación directa, visitas al campo y las almazaras, así como un análisis documental. Los resultados muestran una estructura organizativa eficiente y un proceso de extracción altamente tecnificado que garantiza la excelencia del producto final. Se concluye que múltiples factores influyen en la calidad del aceite de oliva, por lo que se implementan diversos controles para asegurar su autenticidad y competitividad en el mercado.

Palabras clave: Aceite de oliva, AOVE, Oleoestepa, almazara, calidad.

Abstract

Olive oil is an emblematic product of the Mediterranean diet and an economic pillar in Andalusia, Spain. This study aims to analyze the production process in an extra virgin olive oil processing plant, from the reception of raw materials to the final product, including the operations and controls that ensure the quality and authenticity of the final product, at the company Oleoestepa, S.C.A. in Spain. Basic aspects of the EVOO sector and olive cultivation are observed, as well as quality controls and laboratory processes. The study is justified by the growing importance of the olive oil sector within the Spanish agri-food structure and its ability to sustain a highly competitive industry that ensures products of excellent quality. The methodology employed was qualitative, based on direct observation, field and oil mill visits, as well as documentary analysis. The results reveal an efficient organizational structure and a highly technological extraction process that guarantees the excellence of the final product. It is concluded that multiple factors influence the quality of olive oil, which is why various controls are implemented to ensure its authenticity and competitiveness in the market.

Keywords: Olive oil, EVOO, Oleoestepa, oil mill, quality.

Introducción

El aceite de oliva, símbolo de la cultura mediterránea, ha sido utilizado históricamente en alimentación, higiene, iluminación y rituales religiosos. Según el Codex Alimentarius (1981), en la Norma para los Aceites de Oliva y Aceites de Orujo de Oliva, el aceite de oliva se define como el producto obtenido exclusivamente del fruto del olivo (*Olea europaea* L.), excluyendo aquellos aceites obtenidos mediante disolventes, procesos de reesterificación o mezclas con aceites de otra naturaleza. España es el principal proveedor de aceite de oliva en México, representando más del 86% de las importaciones en valor en 2020 (Mercacei, 2021). La creciente demanda internacional y los beneficios nutricionales del aceite de oliva virgen extra (AOVE) justifican el estudio de sus procesos productivos. Por ello, este estudio tiene como objetivo analizar las etapas del proceso de producción, así como los controles necesarios para garantizar la calidad y autenticidad del producto, tomando como referencia la relevancia del sector oleícola en España y su posible aplicación en México; donde el consumo ha crecido un 84% entre 2019 y 2021 (NVNoticias, 2022).

Materiales y Métodos

Esta investigación es de índole cualitativa, en palabras de Hernández et al. (2014), este tipo de estudios “se basan más en una lógica y proceso inductivo (...) van de lo particular a lo general y se centran en comprender en profundidad las percepciones, experiencias y prácticas en torno al fenómeno estudiado” (p. 8). Bajo esta perspectiva, el presente documento busca comprender en profundidad desde la percepción, experiencia y la práctica en la empresa, mediante la descripción e interpretación en torno a la producción del AOVE. La investigación cualitativa tiene sus propias técnicas, es decir, un conjunto de procedimientos y recursos que se emplean para obtener, registrar y analizar los datos que se requieren en una investigación. (Hernández et al. 2014). Por lo tanto, las técnicas permitirán estructurar el proceso de adquisición de conocimientos de manera sistemática, asegurando sean pertinentes, válidos y útiles para el análisis de esta investigación sobre el aceite de oliva virgen extra.

Siguiendo con lo anterior, una vez que ya se ha seleccionado la técnica, es necesario diseñar o adaptar el instrumento que permitió poner en práctica dicha técnica en función de lo que se quiere rescatar, dado que cada técnica cuenta con su instrumento. Cabe recalcar que esta investigación se llevó a cabo mediante la observación participante, es decir, se observaron de manera directa los procesos de elaboración y en paralelo se participó en algunas de estas actividades. La estancia se llevó a cabo en las instalaciones de Oleoestepa, S.C.A. durante los meses de septiembre, octubre y noviembre del 2024. Previo a estos meses, se realizó una revisión bibliográfica sobre el contexto de la industria del aceite de oliva en distintas fuentes como lo son tesis, libros, normativas, informes de algunas instancias como el Consejo Internacional Oleícola (COI), sitios web gubernamentales, entre otros.

Durante el desarrollo del estudio, se llevaron a cabo actividades con el objetivo de conocer las diferentes etapas del proceso de elaboración del aceite de oliva, desde el árbol del olivo hasta que se obtiene el producto terminado; para esto, se rotó en las diferentes áreas y departamentos dentro de la empresa para el tema de interés. Las actividades en las que se tuvo un mayor acercamiento fueron en las plantaciones de olivo, las almazaras, en el departamento de calidad y en los laboratorios de aceituna y aceites. En las salidas técnicas a los campos de olivares se recolectaron muestras de aceituna en distintas fincas. Con el inicio de la campaña, se realizaron recorridos por almazaras para observar el proceso completo de obtención del aceite de oliva virgen extra, desde

la recepción y limpieza de la aceituna hasta su transformación, además de identificar la maquinaria utilizada en cada etapa.

En los laboratorios de aceituna y aceite se trabajó en la familiarización con equipos y metodologías, participando en análisis básicos, de los cuales son: el análisis de la aceituna (donde se ve el porcentaje de humedad, de grasa total), análisis de los aceites (contenido de humedad, de grasa total, peróxidos, su absorbancia en UV, entre otros), análisis de orujos y alperujos (su humedad, materia seca y grasa total). Finalmente, en el departamento de calidad, las actividades estuvieron enfocadas en el aprendizaje sobre la normatividad que regula la calidad de los aceites de oliva, así como los controles necesarios para el envasado y sus normas correspondientes a la seguridad alimentaria IFS/BRC, además de instruirse a cerca de las certificaciones del producto, y de los estudios iniciales y de conservación que son realizados para el control y trazabilidad del producto.

Resultados y Discusión

Descripción de la Empresa

Oleoestepa S.C.A. es una destacada cooperativa española dedicada a la producción y comercialización de aceite de oliva virgen extra de alta calidad; agrupa 19 cooperativas olivareras de la comarca de Estepa y sus alrededores. Se encuentra en el corazón de Andalucía y es una de las principales regiones olivareras de España, conocida por su clima y suelo ideales para el cultivo del olivo. Es una sociedad cooperativa de segundo grado que agrupa a más de 7500 agricultores y con 60,000 hectáreas de olivar (Oleoestepa, 2024), cultivados bajo técnicas de producción integrada o ecológica. Además, sus productos tienen el respaldo de la Denominación de Origen Protegida (DOP) Estepa, quien tiene los criterios más estrictos del mundo al certificar un Aceite de Oliva Virgen Extra (AOVE).

En Oleoestepa se maneja la Producción Integrada, y Producción en Ecológico. La producción integrada consiste en utilizar los mecanismos de regulación naturales, procurando proteger el medio ambiente, la economía de las explotaciones y los requerimientos sociales para obtener alimentos saludables y seguros, en concordancia con los requisitos de cada producto según el reglamento de producción (Oleoestepa, 2023). En cuanto a la producción ecológica, se refiere a un método de producción agroalimentaria donde se respetan los principios de sostenibilidad y se conserva el entorno. Cuando un AOVE se dice que es ecológico, se refiere a que se obtuvo mediante el uso eficiente de los recursos, y que no se utilizó ningún producto químico como pesticidas, abonos minerales, etc.

Oleoestepa al ser una sociedad cooperativa de segundo grado se encuentra dirigida por la Asamblea General, quien es el órgano máximo de representación, sus funciones incluyen la designación del Consejo Permanente y el presidente. Después se tiene al consejo rector, quien, entre la asamblea y la dirección gerente se encarga de asegurar el buen funcionamiento; incluye a los representantes de los socios de las cooperativas asociadas. Enseguida viene la Dirección General, a cargo de Álvaro Olavarría, se encarga de coordinar las distintas áreas y departamentos dentro de la cooperativa.

Oleoestepa cuenta con varias certificaciones que garantizan la calidad, seguridad alimentaria, sostenibilidad y responsabilidad social de sus productos. Ya sea desde las almazaras, pues todas cuentan con certificación ISO 22000 para sistemas de gestión de la inocuidad de los alimentos; así como en los laboratorios y en la planta de envasado (Oleoestepa, 2024). De manera específica, las

certificaciones con las que cuenta son: BRCGS, ENAC laboratorio ISO 17025, Producción Integrada, ISO 14001, Política de calidad laboratorio Oleoestepa, NON-GMO PROJECT, IFS, Denominación de Origen Estepa, KOSHER, Política Sistema Gestión Integrada, Producción Ecológica Europea, Sello JAS Organic, Sello ECO GARDEN Organic Taiwan, IQNET SR10, Comunicación Ambiental a partes interesadas, y Sistema de gestión de la seguridad alimentaria UNE-EN ISO 22000:2019.

Salidas Técnicas a Plantaciones de Olivo

Para poder conocer más sobre el sistema del aceite de oliva, es importante conocer lo que sucede en el campo, por lo que se realizaron salidas a algunas fincas del cultivo del olivo para la recolección de diversas muestras de aceituna junto con algunos técnicos de la Cooperativa Sor Angela de la Cruz, cooperativa asociada a Oleoestepa. Para la toma de muestras se recogieron manualmente de 3 – 4kg de aceituna de las fincas y se llenaron los formatos correspondientes para la identificación del cultivo; estas muestras posteriormente eran llevadas a Oleoestepa para que se realicen los análisis y pruebas correspondientes.

Además de recoger las muestras de aceituna, se lleva un control de plagas mediante mosqueros y placas de trampa. Los mosqueros son rellenados con sulfato diamónico que atrae plagas como la mosca hembra y macho, crisopa y glífode; en cambio, las placas solo atraen las moscas hembra debido a que tienen una feromona que les causa este efecto. También se tenía una revisión visual sobre el estado de madurez de los olivos, estos datos se van registrando en una tablet que está vinculada a su base de datos y se tiene el registro histórico del cómo va madurando el cultivo, además que se adjunta una fotografía del fruto con cada revisión.

En otra salida que se realizó a los cultivos de olivo, se pudo observar el cómo se realiza la cosecha del fruto. La cual es de forma mecanizada, que mediante un tractor hace vibrar el tronco del olivo y mientras que varias personas con varas ayudaban a que cayeran las aceitunas en los fardos previamente extendidos debajo de la copa del árbol, después se juntaba lo colectado en el fardo y se eliminaba la mayor cantidad de hojas y ramas que también habían caído, y finalmente con otro tractor se colectaba la aceituna de los fardos.

Recorrido a Almazaras

Para poder observar el proceso desde la recepción de aceituna hasta la obtención del aceite se realizaron visitas a algunas de las cooperativas asociadas a Oleoestepa S.C.A. y que se encuentran bajo el amparo de la denominación de origen (DOP) “Estepa”, en estas visitas se observó el proceso que se sigue desde que los remolques con aceitunas llegan del campo y los procesos por los que va pasando la aceituna hasta ser transformada en el aceite de oliva virgen extra que después es enviado a Oleoestepa donde es filtrado y envasado. Dichas visitas se realizaron junto con la responsable del departamento de calidad de Oleoestepa, Pilar Higuera, por lo que se fue observando el proceso e instalaciones desde un punto de vista técnico y con algunos aspectos importantes en procedimientos como auditorias o semejantes. Las cooperativas visitadas fueron: “Cooperativa Olivarrera Sor Angela de la Cruz de Estepa, S.C.A.”, “Cooperativa Ntra. Sra. de la Paz, S.C.A.”, “Cooperativa Olivarrera San José de Lora, S.C.A.”, “Cooperativa Arbequisur, S.C.A.”, y “Cooperativa Agrícola El Rubio, S.C.A.”.

En la Figura 1 se representa de forma general como elaborar el aceite de oliva, teniendo en cuenta que el proceso es similar entre las almazaras visitadas. El proceso se inicia con la recepción y

limpieza de las aceitunas, eliminando las ramas, hojas y lavándolas con agua potable. Luego se procede al pesado, donde se toma una muestra que se analiza en el laboratorio de Oleoestepa; y se realiza una clasificación según sus características. Posteriormente se realiza la molienda para obtener la pasta de aceituna, la cual va a someterse a un batido con agua tibia y se le puede añadir un poco de talco para ayudar con el proceso de extracción de aceite.

Después pasa por un proceso de centrifugado, el cual se divide en dos etapas; primero la centrífuga horizontal y después el centrifugado vertical para separar subproductos (alpeorujo y orujo respectivamente). Por último, se somete a una decantación para poder eliminar los sedimentos restantes; y una vez el aceite esté listo se almacena en tanques de acero inoxidable donde se les realizan análisis periódicamente para garantizar su optima conservación y calidad.

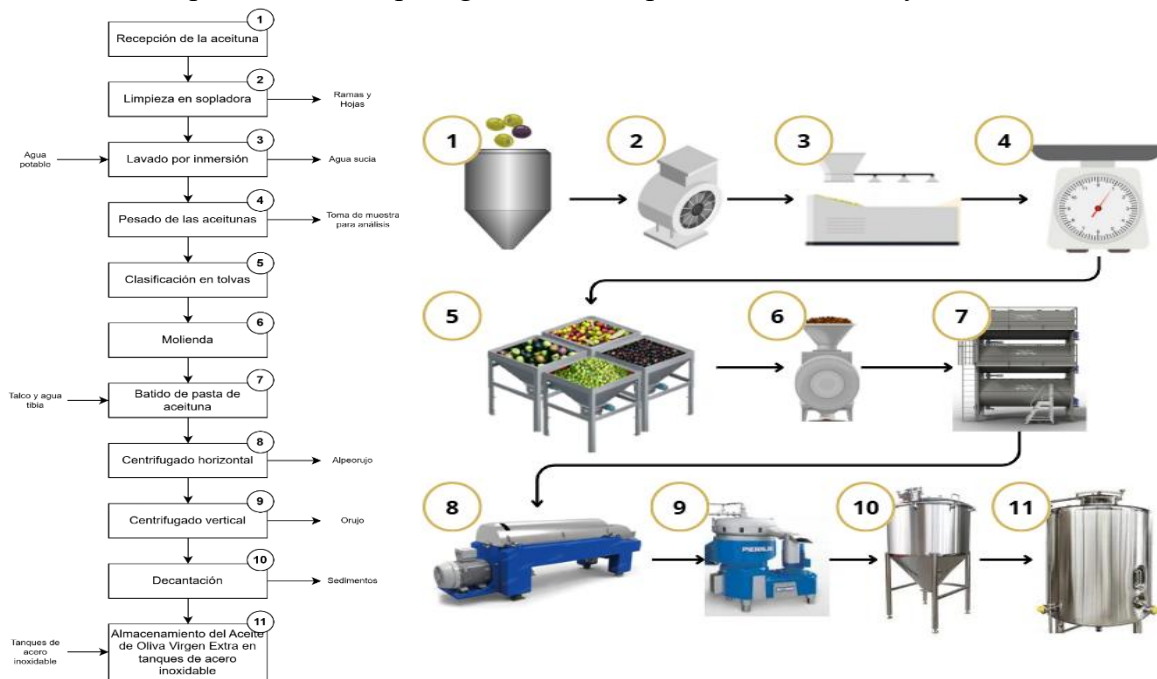


Figura 1. Diagrama de bloques proceso de elaboración aceite de oliva (izquierda) y esquema proceso de elaboración aceite de oliva (derecha). FUENTE: Elaboración propia 2025

De lo observado en general entre las cooperativas visitadas hay muchos aspectos que son importantes de cuidar, por ejemplo, que todas las tuberías que tienen contacto la aceituna/pasta/aceite deben de ser de acero inoxidable, o en su defecto, algunos equipos en caso de ser de hierro deben tener un recubrimiento con pintura epoxi, por ejemplo, las tolvas de descarga o las tolvas pulmón. Entre otros aspectos importantes que se deben cuidar en las almazaras y que se toman en cuenta en las auditorías, es que el patio de recepción debe de estar techado para evitar que algún material extraño pueda caer en la aceituna. Otros aspectos que también son inspeccionados en las auditorías se incluyen que debe revisarse el nivel de pH tras la limpieza, se hacen análisis del agua que se emplea, un control del cloro, además, al hacer la auditoría, se verifica que las certificaciones estén actualizadas y vigentes, así como los equipos necesarios tengan sus calibraciones correspondientes (como las balanzas).

Laboratorio de Aceituna

En este laboratorio las pruebas que se realizan son enfocadas principalmente a muestras de aceitunas que son enviadas por las cooperativas, además de algunas muestras de orujo. Algunas de las actividades que se realizaron dentro de este laboratorio son:

Análisis NIR: el análisis NIR o electroscopia de infrarrojo cercano (Near InfraRed Spectroscopy) es un método de análisis que utiliza la radiación de infrarrojo para medir las propiedades de las muestras de aceituna. Los equipos de infrarrojo que se tienen en el laboratorio son de la marca FOSS, estos pueden ser utilizados para productos alimentarios y agrícolas; tienen la ventaja que arroja los resultados rápidamente (30-60 segundos), requiere de poca o nula preparación de las muestras, además que es un método no destructivo y preciso. En el laboratorio se tienen 3 equipos NIR para aceituna entera, un equipo NIR para la pasta de aceituna y orujo, y un equipo NIR para el aceite líquido. Para la aceituna entera, solo se tiene que llenar la cubeta con la muestra de aceituna, en caso de que sea muy pequeña o de la variedad arbequina se llenan solo $\frac{3}{4}$ de la cubeta, y se introduce al equipo NIR, el cual ya está con su configuración establecida para la muestra. El equipo arroja el resultado en 30 segundos. Para el análisis de la pasta de aceituna y orujo, la muestra se debe poner en unos platillos metálicos, la pasta u orujo debe de estar cubriendo perfectamente el área establecida y debe estar bien compactado, es decir, sin burbujas de aire; también antes se tiene que homogenizar un poco la muestra, y al igual que en el equipo para la aceituna completa, se debe seleccionar el programa ya sea para la pasta o el orujo. Para el NIR de aceite líquido, se necesita poner la muestra en un vial de 8 ml y se introduce en el equipo con la calibración para el tipo de aceite que se esté introduciendo (virgen extra, virgen, lampante).

Análisis R.M.N.: este es un método que analiza la composición y estructura molecular de la muestra. Es un método rápido, fácil de usar, no destructivo. En el laboratorio se tiene un equipo R.M.N., el cual antes del inicio de la campaña debe de ser calibrado, para esto se van introduciendo las muestras con el peso correspondiente al porcentaje de aceite que se trata, y se van registrando en el equipo, para posteriormente solo meter la muestra de la aceituna, las tierras de filtrado y que arroje con la lectura el R.M.N. los resultados de grasa, humedad, que tiene la muestra. Para las muestras de aceituna y orujo, se debe pesar primero 30 gramos de la pasta de aceituna u orujo y llevar a la estufa a 105°C hasta que esté completamente seca, y esta muestra seca ya se puede introducir en un tubo de cristal para el R.M.N. En el caso de las tierras de filtrado, se pesan 15 gramos de la muestra, e igualmente debe ser secado en la estufa a 105°C.

Análisis Soxhlet: es utilizado para medir la grasa que contiene las muestras de aceituna, además que ayuda a determinar su rendimiento graso. Se trata de extraer todo el aceite que tenga la muestra con un disolvente, y se cuantifica pesándolo al final. Es un método lento, pero los resultados son de los más fiables. Para analizar la muestra por este método es necesario prepararla, para esto se tienen que moler las aceitunas y homogenizar la pasta resultante, después se pesan 30 gramos de esta y se deja secar en la estufa a 105°C hasta que esté totalmente seca. Después se sacan de la estufa, y cuando estén a peso constante se registra el peso para conocer el agua perdida y obtener así la diferencia de peso y por ende el porcentaje de humedad. Después, la muestra desecada se va a envolver en papel filtro en forma de cartucho, que es identificado y pesado, y se introduce en el extractor Soxhlet añadiéndole disolvente para facilitar la extracción del aceite. Se deja que el sistema trabaje, con la recirculación del disolvente por el cartucho, y de esta forma se va “lavando” el cartucho. Es decir, el disolvente se volatiliza y condensa, repitiéndose estas operaciones de sifonado y arrastre hasta que sea necesario; el tiempo varía dependiendo del disolvente empleado, para el éter de petróleo es de mínimo dos horas. Cumplido este tiempo, se retira el cartucho de muestra y se vuelve a poner el matraz con el extractor y refrigerante en las placas de calor, esto con

el objetivo de retirarle en su totalidad (o lo mayor posible) el disolvente al aceite que queda en el matraz. Después se retira el matraz con la grasa que se extrajo y se introduce a la estufa para eliminar el disolvente restante. Para comprobar que es pura grasa, se hace mediante el olfato, corroborando la ausencia del olor a disolvente en el matraz. Finalmente, para conocer el contenido graso en la muestra, se pesa el matraz ya que esté se haya enfriado. Para el cálculo, se emplea la siguiente ecuación:

$$\% \text{Aceite en húmedo} = \frac{\text{Peso del matraz con aceite} - \text{Peso del matraz}}{\text{Peso inicial de la masa sin desecar}} * 100 \quad (1)$$

Método ABENCOR: es un método que se utiliza para determinar el rendimiento industrial de las aceitunas, consiste en una reproducción a escala del proceso industrial siguiendo las mismas fases, que son: la molienda, batido, centrifugación y decantación. Para este proceso es necesario de un molino, una termobatidora, una centrifuga tipo cesta, y probetas. Generalmente las muestras que se someten al ABENCOR son las pertenecientes al proyecto de compuestos fenólicos, el cual se lleva en conjunto con las oficinas de la DOP Estepa, para dicho proyecto el equipo de técnicos de la cooperativa Sor Ángela de la Cruz se encargan de ir a campo a coleccionar las muestras y las llevan al laboratorio de aceituna de Oleoestepa donde el equipo se encarga de analizarlas. El procedimiento que se sigue para la extracción de aceite con este método consiste en primero moler de 3 – 4kg de muestra de aceituna, la pasta se homogeniza y se deposita en los casos de acero inoxidable para colocarlos en la batidora, la cual debe de estar a una temperatura no superior de 27°C. Durante el batido se le añade agua caliente y talco como coadyuvante, el tiempo de batido no debe ser mayor de 90 minutos. Después del batido se pasa a la centrifuga, la cual se pone la muestra durante 1 minuto, y se va coleccionando con una probeta el mosto oleoso por la parte inferior de la centrifuga; después se enjuaga el recipiente de la batidora con agua caliente y se pasa a la centrifuga para limpiarla, y se deja otro minuto para recuperar la mayor cantidad. Posteriormente se deja reposar la probeta hasta que sedimente y se colecciona el aceite obtenido.

Molido de muestras foliares: generalmente estas muestras son realizadas meses antes de que inicie la campaña con el objetivo de que el agricultor conozca el estado de su cultivo y si necesita aplicar algún nutriente. Para esta práctica las muestras de hojas foliares de los olivos son enviadas y son lavadas perfectamente y enseguida se introducen a la estufa durante 24 horas a una temperatura de 60°C. Después se muelen perfectamente y se guarda en dos botes la muestra, uno es enviado con otro laboratorio certificado para realizar los análisis correspondientes y el segundo bote se lo quedan en laboratorio como testigo o por si es necesario hacer alguna repetición.

Índice de madurez: este método se utiliza para evaluar el grado de maduración de las aceitunas y de esta forma conocer el momento óptimo para cosechar los olivos. Una forma para calcular este índice consiste en el conteo de 100 aceitunas de una muestra de un kilo, y se separan dependiendo de la coloración que presenten, se clasifican y se asigna un valor como se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Valores para índice de madurez

0	Aceitunas cuya piel es color verde intenso
1	Aceitunas cuya piel es de color verde amarillento
2	Aceitunas cuya piel es de color verde con motas rojizas en menos de la mitad del fruto
3	Aceitunas cuya piel es de color rojizo o morada en más de la mitad del fruto. Final del envero
4	Aceitunas cuya piel es de color negro pero la pulpa blanca

5	Aceitunas cuya piel es de color negro y la pulpa es morada sin llegar a la mitad de la pulpa
6	Aceitunas cuya piel es de color negro y la pulpa es morada sin llegar al hueso
7	Aceituna cuya piel es de color negro y la pulpa es morada totalmente hasta el hueso

Fuente: Elaboración propia

Para calcular el dato de índice de madurez, después de separar y clasificar las aceitunas, se debe efectuar el sumatorio del número de frutos de cada categoría por el índice numérico de la categoría correspondiente, y se aplica la ecuación (2); donde, las letras representan el número de frutos de cada categoría; se estima que el momento idóneo de recolección es cuando los valores sean cercanos a 3.50. Sin embargo, es importante tener en cuenta que para algunas variedades que no alcanzan el color negro en su maduración, se deben tener otros parámetros de referencia para el indicador de recolección del fruto. De igual manera, en el laboratorio se tiene pegada una imagen con las referencias de color, y otra con los parámetros establecidos, que sirven de guía.

$$IM = \frac{(0*A)+(1*B)+(2*C)+(3*D)+(4*E)+(5*F)+(6*G)+(7*H)}{100} \quad (2)$$

Relación pulpa/hueso: Entre las pruebas que se les hacen a algunas de las muestras es calcular la relación pulpa/hueso; para calcular esto se deben pesar 50 aceitunas y se registra el peso, posteriormente se separa manualmente el hueso de la pulpa con ayuda de un cúter y un mazo. Luego se tiene que pesar por separado los huesos y la pulpa, para así calcular el porcentaje del hueso del peso total del fruto.

Calibre: es importante conocer el calibre del fruto, este dato puede ser obtenido de dos maneras dentro del laboratorio; la primera consiste en pesar 300 gramos de la muestra de aceitunas y después contar el total de aceitunas que hay en esos 300 gramos para conocer el calibre; la otra manera es con apoyo del equipo NIR, para esto se tiene una calibración en el equipo, entonces se tiene que seleccionar la opción del programa y se pasa 3 veces seguidas la misma muestra en el equipo, solamente cambiándola de cubeta cada vez, el equipo arroja el dato del calibre después de la tercer lectura además de dar otros puntos como la grasa, humedad, etc.

Recepción de muestras: En el laboratorio de aceituna llegan las muestras de las diversas cooperativas, y para poder facilitar la expedición de los resultados de las muestras al analizarse se necesita “darles entrada en el sistema”. Esto consiste en que cuando la muestra es recibida, el código de ticket que trae se da de alta en el sistema brindándole un código para poder ir cazando la información y resultados que se van obteniendo en los equipos posteriormente (NIR, RMN, Soxhlet, etc., según se requiera). Dicho código está elaborado de la siguiente manera: los primeros 4 dígitos son el código de campaña, los siguientes 3 dígitos son el cliente, después 5 dígitos son el número de ticket y finalmente el último número es aleatorio.

Proyectos para extracción de aceite: Otras de las actividades que se desarrollaron en el área del laboratorio de aceituna fue apoyar con dos proyectos que se llevaban en conjunto con organizaciones externas; estos fueron con las oficinas de la Denominación de Origen Protegida (DOP) Estepa y con el Banco Mundial de Germoplasma del Olivo (BMGO) de Córdoba. El primer proyecto consistía en un estudio de biofenoles en la aceituna, tenía como objetivo

conocer la evolución de los mismos, su perfil de ácidos grasos y estabilidad oxidativa a lo largo de su maduración, y como varía dependiendo de factores como la variedad, la zona geográfica, el suelo, tipo de cultivo, índice de maduración, rendimiento graso, etc. Este proyecto consistía en analizar las muestras traídas en el NIR de fruto entero para determinar su rendimiento graso, acidez, humedad, etc. Y posteriormente se extraía el aceite mediante sistema ABENCOR. Este aceite obtenido se dejaba sedimentar y se filtraba, en caso de no ser suficiente la cantidad extraída, era sometido a una segunda centrifugación en tubos Falcon; finalmente el aceite extraído se guardaba en frascos de cristal. El proyecto en conjunto con el BMGO de Córdoba, tenía similitudes con el anterior, ya que las muestras eran enviadas a Oleoestepa, y el laboratorio de aceituna las analizaba en el NIR y les extraía la mayor cantidad de aceite posible por ABENCOR, el cual se filtraba y se almacenaba en frascos. Su finalidad principal de este proyecto era conocer los rendimientos de las diferentes variedades que se tenían de los olivos.

Laboratorio de Aceites

En este laboratorio se realizan las pruebas correspondientes para conocer la calidad del aceite. Cuando se realizan las pruebas tanto de los lotes recién envasados, o para corroborar el estado de algún aceite de más tiempo, siempre se mandan los informes al departamento de calidad. En este laboratorio se realizaron las pruebas de índice de peróxidos y medición de ácidos grasos libres. El índice de peróxidos sirve para conocer qué tan oxidado o no se encuentra el aceite; consiste en pesar de 2 – 3 g de aceite, al cual se agrega en una solución de cloroformo (para disolver) y ácido acético (para estabilizar) y como agente oxidante se añade yoduro de potasio, esta mezcla se agita durante un minuto y después se deja reposar 5 minutos sin que le dé la luz, posteriormente se le añaden 75 mL de agua pura y almidón como indicador, para la valoración se emplea biosulfito de sodio. La medición es cuando la solución cambie a un color claro. Para la medición de ácidos grasos libres, se tiene una disolución de la muestra en una mezcla de disolventes y mediante una solución etanólica hacer la valoración de los ácidos grasos libres. Esta prueba se hace mediante la medición de acidez, para esto se pesan de 10 – 15 g de aceite, y se le añaden 50 mL de etanol, 50 mL de dietiléter, y fenoltaleína como indicador, posteriormente se mide el gasto y se calculan los ácidos grasos libres.

Departamento de Calidad

De manera general, las actividades que se realizaron en esta área fueron como apoyo en el registro de los datos correspondientes a la trazabilidad de los lotes envasados; además de la verificación de algunos de los documentos en vigor que se emplean en la empresa para el análisis de los productos, por ejemplo. Algunas de las actividades que se desarrollaron son explicadas a continuación:

Registro de boletines de análisis de lote envasados: se manda al laboratorio una muestra de los lotes del aceite que se van envasando, después el laboratorio envía al departamento de calidad el boletín de análisis con los datos nutricionales y de las características del aceite, estos datos son registrados en dos tablas Excel, donde se lleva el registro de todos boletines emitidos ordenados según la campaña a la que pertenecen y su tipo de perfil del aceite. De igual manera, dichos boletines de análisis son subidos a la base de datos de la empresa, para ayudar a tener una trazabilidad clara.

Registro de boletines de conservación: el estudio de conservación se realiza a los aceites que están próximos a su fecha de consumo preferente, o en el caso que se reciba alguna alerta o queja por parte de los consumidores que indique que hay alguna alteración en las propiedades del producto. De igual manera, con el análisis de los lotes envasados, una muestra del aceite es enviada al

laboratorio para analizar, y en el departamento de calidad se recibe el boletín de análisis de conservación el cual va a ser registrado en un Excel que va a comparar los datos del análisis inicial de cuando se envasó el lote y del análisis que se acaba de realizar. El boletín emitido se sube a la base de datos para el control de la trazabilidad.

Registro de materias auxiliares: el control de la trazabilidad en cuanto a las materias auxiliares empleadas en el envasado de los productos se lleva con ayuda de formatos elaborados en Excel según el perfil del aceite, la presentación y el cliente. En estos formatos se registran el proveedor, el número de lote, el número de palet, la cantidad y la fecha de cada materia auxiliar; las cuales son los envases, los tapones, las cajas y las etiquetas. Para poder conocer dichos datos de los lotes, el personal de la planta va guardando las etiquetas de cada materia auxiliar que se va utilizando para el envasado de los lotes de aceite, y estos son entregados en el departamento de calidad para poder llevar el registro de estos en los formatos mencionados.

Almacen de lotes envasados: de todos los productos terminados que han sido envasados se almacenan generalmente 3 botellas (varía la cantidad dependiendo de la presentación y cliente) después de haber registrado los materiales auxiliares empleados, además de haberle realizado su boletín de análisis correspondiente; esto con el objetivo de llevar un control y apoyo de trazabilidad del lote. Además, cercana a la fecha de consumo preferente o en caso de ser necesario (por ejemplo, que algún defecto sea reportado) se toma una muestra para poder realizar su estudio de conservación correspondiente.

Registro de análisis de seguimiento de filtrado: se analiza la tierra de filtrado posterior del proceso de filtración de algún aceite con el fin de conocer la merma que hay en dicho proceso. Esas tierras de filtrado son analizadas en el laboratorio de aceituna, y dicho informe es recibido por el departamento de calidad, donde los datos son registrados en un formato establecido en Excel y se van calculando con la base de datos y el informe (Figura 2).

Fecha De Análisis	Partes por ciclo de Filtración	Filtro	Descarga celulosa agotadas (Kg)	Resultado laboratorio (% grasa)	Suma Aceite filtrado (Kg)	Suma de celulosa empleada (Kg)	Aceite retenido en filtro (Kg)	Merma de aceite (%) [Limite: 0,3%]	kg celulosa por Tm de aceite filtrado (ciclo)
Dato del informe	Dato de la base de datos	Dato del informe	Dato del informe	Dato del informe	Suma de aceite que se filtra en cada parte	Suma que se va utilizando en cada parte del ciclo de filtración	(3)	(4)	(5)

Figura 2. Formato seguimiento de filtración

Las últimas tres columnas se llenan de la siguiente manera:

$$\text{Aceite retenido en filtro (kg): } \frac{(\text{Descarga de celulosa agotada})(\text{Resultado laboratorio grasa})}{100} \quad (3)$$

$$\text{Merma de aceite (%): } \frac{(\text{Aceite retenido en filtro})(100)}{\text{Suma de aceite filtrado}} \quad (4)$$

$$\text{Kg de celulosa por Tm de aceite filtrado (ciclo): } \frac{(\text{Suma celulosa empleada})(100)}{\text{Suma aceite filtrado}} \quad (5)$$

Registro de albaranes de entrada: los albaranes de los materiales que se ocupan para el producto final son rigurosamente verificados, de manera que lo que se recibe coincide a lo que el albarán especifica. Posteriormente, los albaranes son escaneados para poder subirlos a la base de datos de la empresa y tener una trazabilidad clara. Dependiendo del tipo de material que se trate varia que

aspectos se revisan en cada uno de estos, sin embargo, para la mayoría de los materiales debe de llevar la firma del departamento de calidad, así como de quien se encarga de la recepción del producto; en el caso de las etiquetas, se revisa también por el personal del área de diseño, pues en las etiquetas se revisa tanto el bobinado, el texto, su código EAN (European Article Number) por sus siglas en inglés), el lote y el diseño de las mismas.

Verificación de documentos en vigor: esta actividad se enfoca en comprobar que los documentos que se están utilizando dentro de la empresa, ya sea para el registro de datos, protocolos, expedición de documentos, entre otros, estén actualizados a sus últimas ediciones acordadas; estos documentos son acerca de los procedimientos generales y técnicos que se aplican dentro de la empresa. Para comprobar que un documento este actualizado, se revisa que el logotipo esté en el formato actual, que lleve las firmas de los responsables que son: Responsable de calidad, Responsable de laboratorio y Director gerente; de igual manera, se verifica que la fecha del pie de página del documento corresponda con la fecha indicada de la última edición. Además de los aspectos mencionados, se tiene un Excel donde se guarda el listado de los documentos anexos de los documentos en vigor, en dicho Excel se verifica que los archivos estén actualizados en cuanto a que sean los correspondientes a lo que se indica en el documento.

Documentación de apoyo para auditorías a almazaras: es necesario que se realicen auditorías a las cooperativas asociadas con el fin de certificar que sus procedimientos y actividades sean correspondientes con lo que ofrecen en su producto, para facilitar este trabajo, se crean algunos documentos estándar para conocer el estatus de la cooperativa con respecto a características relevantes e importantes que se consideran en las auditorias. Para poder facilitar dicha tarea previa a la auditoria, la empresa crea una nube donde las cooperativas se conectan y van colocando parte de la documentación requerida, por ejemplo, que los productos de limpieza que emplean sean aprobados o que sus certificaciones de productos estén actualizadas, entre otros aspectos.

Actividades de apoyo a la capacitación: el departamento de calidad en ocasiones se encarga de actividades correspondientes a la capacitación de personal (interno y de las cooperativas) en cuanto a aspectos como las buenas prácticas, o también de mostrar puntos de interés sobre el proceso para los clientes interesados o productores; para estas tareas se requiere en ocasiones de un apoyo visual como lo son las presentaciones en PPTX. Como parte de las actividades desarrolladas en la estancia fue realizar unas diapositivas con apoyo de un Excel que me proporcionó la empresa sobre los marcos de plantación, la cual estaba dirigida a sus clientes; de igual manera, la actualización de una presentación sobre las buenas prácticas, para la cual es necesario cotejar la información con la normativa actualizada correspondiente.

Envasado del producto

Como ya se mencionó, Oleoestepa cumple con las funciones de producción y comercialización del aceite de oliva virgen extra; la primera parte se lleva en las almazaras asociadas donde procesan las aceitunas y elaboran el AOVE, y después el aceite producido es llevado a Oleoestepa para su envasado y distribución del producto terminado. El proceso de envasado se describe a continuación. El aceite es transportado mediante tanques de acero inoxidable desde los depósitos de las almazaras a Oleoestepa. Cuando se recibe el aceite en la empresa lo primero es filtrarlo para eliminar impurezas y partículas sólidas que pudiese tener y afectar su calidad. Después de su filtrado se pasa a almacenaje en depósitos donde se va clasificando dependiendo del perfil del aceite y el destino. Para poder tener esta clasificación, se van realizando análisis en distintas etapas del

proceso para conocer sus atributos, y de esta manera se va realizando su clasificación. Todo el aceite se transporta mediante tuberías de acero inoxidable.

El proceso de envasado está muy automatizado; sin embargo, si hay personal que está apoyando y supervisando que todo funcione correctamente en la línea de producción. Se tienen cuatro líneas de producción, la línea 1 está destinada a envases de vidrio, línea 2 es para los envases de pet y lata, la línea 3 se destina para el envasado de miniaturas, y la línea 4 es de alta capacidad para pet y vidrio para la producción de Mercadona, que son una cadena de supermercados en España. Cada línea de envasado funciona de la siguiente manera, los envases vacíos pasan primero por una sopladora, que les va dando la vuelta a los envases e inyecta aire para eliminar posibles impurezas, después se va llenando con el aceite de oliva virgen extra y se le coloca su tapón, posteriormente se le va colocando la etiqueta correspondiente al destino, cliente, y perfil del aceite. Ya que están los envases listos se van empacando en cajas de cartón y las capacidades varían dependiendo el pedido que tengan. Por último, pasan a una emplayadora para asegurar que el embalaje no sufra daños de ningún tipo. Una vez el producto empacado se pasa a la bodega del producto terminado y listo para su distribución tanto nacional como internacional.

Es importante mencionar que a lo largo del proceso se toman muestras con el fin de asegurar que la calidad del producto sea la mejor. Algunos de los momentos de la toma de muestras son antes de mandar algún depósito de aceite a envasar, se realizan pruebas en el laboratorio y su respectiva cata y cuando ambos departamentos dan el visto bueno ese aceite puede mandarse a envasar. Otro punto importante es que el personal del departamento de calidad toma algunas botellas listas de cada lote (generalmente 3) para guardar en su almacén de producto terminado y para su trazabilidad. De igual manera, se tiene que registrar para la trazabilidad sus materias auxiliares que utilizan para cada lote.

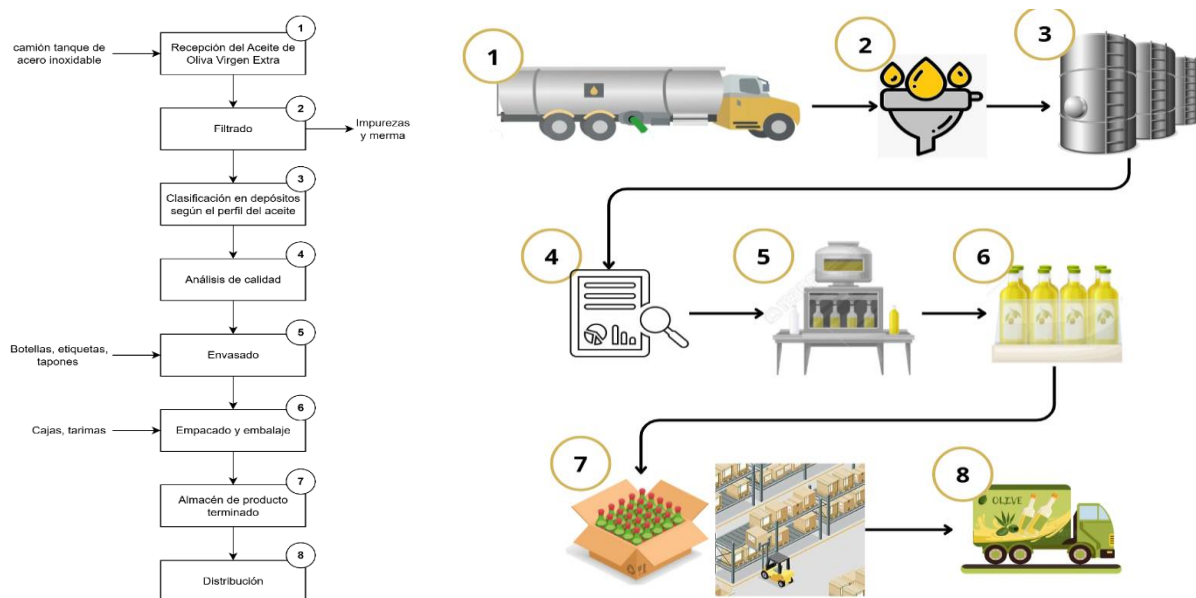


Figura 3. Diagrama de bloques proceso de envasado (izquierda) y esquema proceso de envasado (derecha).

El proceso de envasado se representa en la Figura 3 a continuación. Aquí se puede observar cómo es que se recibe el aceite en camiones cisterna de acero inoxidable y se le realiza un filtrado para eliminar impurezas, tratando de reducir la merma del aceite. Luego se va clasificando en depósitos según el perfil y destino del aceite, se somete a un análisis de calidad. El producto pasa posteriormente al envasado en botellas con su respectiva etiqueta, seguido del empacado en cajas y tarimas. Finalmente, se pasa al almacén de producto terminado y se distribuye mediante transporte especializado.

Mantenimiento industrial

El mantenimiento en las instalaciones del sector oleícola es una parte esencial para garantizar la eficiencia operativa, la seguridad alimentaria y la calidad del producto final. Dado que el proceso involucra maquinaria especializada (como molinos, batidoras, centrifugadoras, entre otros), la implementación de un sistema de mantenimiento preventivo y correctivo resulta indispensable para evitar que el proceso no se vea afectado, así como poder reducir costos operativos y prolongar la vida útil de los equipos; es por eso que a continuación se hace mención de las acciones de mantenimiento en distintas partes del proceso.

Mantenimiento en campos de olivar: para poder asegurar que en este aspecto la maquinaria destinada a las labores del campo funcione correctamente se les realizan constantes chequeos a los tractores, permitiendo así que cuando se utilicen estén en buen estado y en condiciones aptas para utilizarse sin poner en riesgo al usuario o a las personas trabajando alrededor. Para esto, se les realiza un mantenimiento preventivo; por ejemplo, es el caso de los tractores vibradores, previo a la cosecha de la aceituna se le realiza un chequeo para verificar que el equipo y sus accesorios funcionen correctamente para así evitar posibles pérdidas y daños durante la recolección. De igual manera, en el caso de los químicos o sustancias que se pueden utilizar para el control de plagas, se cuida que no sean factor de contaminación para las aceitunas y el consumidor final, además de revisar constantemente sus fechas de caducidad.

Mantenimiento en la almazara: en esta etapa del proceso es de suma importancia aplicar un constante mantenimiento, sobre todo de manera preventiva, ya que una pausa no programada en esta área podría implicar incluso el riesgo de que se contamine el lote de aceite que se está produciendo y esto provocaría pérdidas significativas. Para que se cumpla lo anterior, Oleoestepa solicita constantemente sus certificados y documentos que aseguren que se está trabajando con el equipo en buen estado y conforme se describe en las normativas; por ejemplo, se revisa que las bandas transportadoras se encuentren limpias y sean de grado alimenticio, además de tener presente la vida útil de las mismas para poder reemplazarlas cuando es preciso, evitando así un accidente o alguna pérdida mayor. De igual manera, para los equipos que se utilizan durante la extracción del aceite, se limpian y desinfectan para evitar contaminaciones en el producto y que se pueda deteriorar más rápido la maquinaria.

Mantenimiento en laboratorios: ya sea para el laboratorio de aceituna o el de aceite, se revisa constantemente que los equipos de análisis como el NIR, el RMN, la estufa, entre otros estén trabajando debidamente y arrojando los datos correctos; para esto, se deben calibrar los equipos y verificar que su funcionamiento es el mejor al momento de hacer las pruebas. Además, en el caso de algunos equipos se realizan pruebas a lo largo del día para verificar que sigan calibrados y que estén dando los datos correctos. En caso de que algún equipo falle o que ocupe una reparación menor, la empresa cuenta con las refacciones pertinentes y hay personal capacitado para realizar dicho mantenimiento correctivo.

Mantenimiento en el departamento de calidad: principalmente el mantenimiento que se va a estar aplicando en esta área corresponde a una constante revisión de los equipos informáticos, y dispositivos electrónicos los cuales son de apoyo para ir registrando los datos esenciales para la trazabilidad de los lotes que se producen. Además, mediante la plataforma que conecta a todas las cooperativas, el departamento de calidad se encarga de supervisar que estén cumpliendo correctamente con la normativa y a la vez estén funcionando en orden.

Mantenimiento en el envasado: en el área de envasado, Oleoestepa cuenta con un espacio tipo taller para almacenar algunas refacciones que pudiesen ser necesarias en caso que algún equipo falle. De igual manera, se tiene el personal capacitado en caso de que se necesite realizar algún cambio en alguna pieza. A los equipos se les realiza un mantenimiento constante con la finalidad de asegurar que los procesos no se vean entorpecidos por algún tipo de falla y de esta manera evitar pérdidas tanto de producción como económicas. De igual manera, se capacita constantemente al equipo para que puedan operar los equipos de la mejor manera evitando incluso accidentes.

Diagnóstico FODA de la empresa

Como parte de lo planteado, para la realización del proyecto se hizo un diagnóstico de la empresa con el cual se aplicó un análisis FODA. Las áreas donde se centra dicho análisis fueron en las áreas de Calidad y Medioambiente, y Laboratorios; el área de “Laboratorios” se involucran en varias secciones, que son el Laboratorio de Aceites, Sala de Cata y Laboratorio de Aceituna, principalmente se estuvieron desarrollando actividades en el Laboratorio de Aceituna y en Calidad. El análisis FODA ayuda a identificar de manera más fácil y rápida algunos aspectos internos y externos que pueden influir, en este caso en la empresa, y de esta manera elaborar diferentes estrategias para afrontar dichas situaciones. Con base en lo observado en las situaciones analizadas en Oleoestepa, se desarrolla el siguiente cuadro de estrategias (Cuadro 2), donde se presentan en la primera columna y en la fila superior las observaciones realizadas en la matriz FODA.

Cuadro 2. Estrategias FODA

Factores Internos Factores Externos	Fortalezas	Debilidades
	F1 Productos de alta calidad F2 Tienen Denominación de Origen Protegida F3 Diversidad de productos F4 Modelo de sociedad cooperativa que une diversos productores, manteniendo estándares de calidad F5 Es sostenible y responsable con el medio ambiente F6 Está en constante innovación y actualización F7 Toda la empresa está conectada y actualizada mediante una base de datos F8 Trazabilidad eficiente	D1 Es difícil supervisar que todo el personal cumpla sus funciones correctamente D2 El personal en el Dpto. de calidad no es suficiente para las tareas que hay D3 La rotación de personal en laboratorio requiere que se capacite a quienes van llegando y se verifique sus procedimientos
Oportunidades	FO	DO
O1 Satisface las diferentes preferencias de los consumidores O2 La población española está muy acostumbrada a consumir AOVE O3 Existe la posibilidad de extender su mercado a otros continentes	F3-O1 Su diversidad de productos le permite satisfacer a mayor número de consumidores y sus preferencias F1-O2 La población española utiliza el AOVE para su cocina y al ofrecer productos de alta calidad son líderes	D2-O3 Se puede expandir a otros países, pero es necesario cumplir con la reglamentación, y es el dpto. de calidad quien se encarga de eso, por lo que se requiere más personal

O4 Las ventas online permiten extender su mercado e impulsar su crecimiento O5 Su producción de ecológico les permite crecer en dicho mercado	F5-O5 Aseguran una producción ecológica que les permite ampliarse en el mercado y ser a la vez responsables con el medio ambiente y sostenibles F6-O4-O3 El estar a la vanguardia en cuanto a tecnología les permite darse a conocer en diferentes lugares del mundo, abriendo así la posibilidad de expandirse, e igual crecer con sus ventas online	
Amenazas A1 Condiciones meteorológicas adversas como granizadas y sequías A2 Fluctuaciones del precio en el mercado A3 Altamente dependientes del internet	FA F3-A2 Su diversidad de productos les permiten ser competitivos en el mercado F6-F7-A3 Todo lo manejan con la base de datos, lo cual facilita su desempeño, pero si el internet falla se quedan “varados”, por lo que necesitan un protocolo para esos casos	DA D2-A3 El tener todo en la base de datos facilita las tareas y su organización al personal del dpto. de calidad D3-A1 Las condiciones climatológicas afectan los rendimientos del cultivo y la cosecha, por lo que influye en la cantidad de personal nuevo que se debe contratar y asesorar.

FUENTE: elaboración propia con datos recabados en Oleoestepa, 2024

Con lo anterior se puede determinar que existe la posibilidad de expandir el mercado a nivel internacional; aprovechando la DOP “Estepa” y los productos de alta calidad que se producen, además que la empresa puede expandir la lista clientes en otros países para crecer sus ventas, apoyándose en la tienda online y en uso de las tecnologías. Además, gracias a su alto nivel de producción y diversidad de productos que tiene la empresa pueden diversificar aún más y ser más competitivos en el mercado, ya sean con algunas ediciones limitadas o productos complementarios para poder ampliar la red de consumidores. Asimismo, se puede realizar alguna inversión tecnológica agrícola; ya que hay una gran dependencia a las condiciones climáticas, así como el tratar de desarrollar nuevas formas de manejo del cultivo para tratar de aminorar los daños por el clima en los cultivos para los años próximos. Además, seguir cuidando que el impacto ambiental sea leve. También tratar de establecer alianzas estratégicas para mejorar su red y fortalecer la cadena de suministro tanto del producto como de la materia prima. También, les sería útil tener manuales o protocolos de acción para ciertas situaciones, por ejemplo, si el internet llega a fallar, tener un plan de acción que evite entorpecer el trabajo; igualmente, procurar la contratación de personal para el departamento de calidad ya que la cantidad de tareas y responsabilidades, es en ocasiones más de la que el personal encargado pueda gestionar.

Oleoestepa se encuentra en constante innovación y mejora continua ayudándose con instituciones y programas externos e internos, para así estar a la vanguardia en este sector y poder responder a las fluctuaciones del mercado. Además, apoya en la creación de empleos, fortaleciendo la economía local y nacional.

Conclusiones

El estudio permitió cumplir con los objetivos planteados. En primer lugar, se logró analizar de manera integral el proceso de elaboración del aceite de oliva virgen extra, confirmando que cada etapa (desde la recepción de la aceituna hasta el envasado) es crítica para garantizar la calidad y autenticidad del producto final. Asimismo, se cumplió el objetivo de identificar los principales equipos y operaciones unitarias, constatando que la tecnificación y el control de parámetros como tiempo y temperatura son esenciales para preservar las propiedades sensoriales y nutricionales del aceite.

En relación con los métodos de análisis de calidad, se verificó la importancia de técnicas como NIR, RMN, Soxhlet y ABENCOR, que permiten asegurar la trazabilidad y autenticidad del producto, cumpliendo con el tercer objetivo específico. También se documentó la estructura organizativa y las certificaciones de Oleoestepa, lo que refuerza la confianza del consumidor y la competitividad internacional. Finalmente, se cumplió el objetivo de comprender la logística de distribución y las condiciones de venta, evidenciando que la trazabilidad y la presentación del producto son factores clave para su posicionamiento en el mercado.

Este proyecto permitió comprender de manera integral las etapas y factores que intervienen en la producción de aceite de oliva virgen extra de alta calidad; Oleoestepa destaca por contar con tecnología avanzada y procesos bien estructurados que aseguran eficiencia y calidad desde la recolección de la aceituna hasta el envasado, minimizando pérdidas. Su apuesta por la innovación,

la investigación y la capacitación constante del personal la mantiene a la vanguardia y le permite adaptarse a las demandas del mercado. La empresa garantiza la calidad del producto mediante controles en cada fase: desde la formación de productores y el acceso a insumos, hasta auditorías en las almazaras para verificar el cumplimiento de normativas. Además, refuerza su compromiso ambiental con prácticas sostenibles, como el uso de técnicas modernas de extracción, plantas purificadoras de agua y compostaje de residuos, lo que asegura la conservación de las propiedades del aceite y la protección de los recursos.

En el ámbito socioeconómico, Oleoestepa contribuye a la generación de empleo y al fortalecimiento de la economía local y nacional. La experiencia del proyecto también permitió valorar la importancia de cuidar cada detalle del proceso, incluso aspectos como el transporte de la aceituna, y reconocer que, aunque muchas etapas estén automatizadas, la supervisión constante es esencial.

En conjunto, este aprendizaje subraya que cada etapa es significativa no solo para garantizar la excelencia del producto, sino también para impulsar el crecimiento interno de la empresa y su consolidación en los mercados nacional e internacional.

Literatura Citada

- Codex Alimentarius. (1981). *CXS 33-1981 NORMA PARA LOS ACEITES DE OLIVA Y ACEITES DE ORUJO DE OLIVA*.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. d. (2014). *Metodología de la Investigación*. Ciudad de México: Mc Graw-Hill.
- Mercacei. (18 de octubre de 2021). *México, un mercado en crecimiento para el aceite de oliva*. Obtenido de Mercacei: <https://www.mercacei.com/noticia/55360/actualidad/mexico-un-mercado-en-crecimiento-para-el-aceite-de-oliva.html>
- NVNoticias. (16 de julio de 2022). *Durante pandemia aumentó 84% consumo de aceite de oliva en México*. Obtenido de NVNoticias: <https://nvnoticias.mx/index.php/2022/07/16/durante-pandemia-aumento-84-consumo-de-aceite-de-oliva-en-mexico/>
- Oleoestepa. (03 de febrero de 2023). *¿Qué es la producción integrada?* Obtenido de Oleoestepa: <https://www.oleoestepa.com/cultura-aove/que-es-la-produccion-integrada/>
- Oleoestepa. (23 de mayo de 2024). *Quiénes somos*. Obtenido de Oleoestepa: <https://www.oleoestepa.com/quienes-somos/>
- Oleoestepa. (07 de noviembre de 2024). *Seguridad Alimentaria – sellos y certificaciones*. Obtenido de Oleoestepa: <https://www.oleoestepa.com/aceite-de-calidad/seguridad-alimentaria-sellos-y-certificaciones/>

Viabilidad financiera del sistema de riego por goteo subterráneo en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*) en la región centro-sur del estado de Chihuahua.

Lic. Lilia Carolina Baca Islas⁴ (p321416@uach.mx), **Dra. Jerónima Antonieta Pérez**⁵ (jeperez@uach.mx), **Dr. César Guigón López**² (cguigon@uach.mx), y **Dr. Jorge Alberto Sánchez Bernal**² (jsanche@uach.mx).

Resumen

La disponibilidad limitada de agua en las regiones áridas y semiáridas del norte de México ha impulsado la adopción de tecnologías de riego que incrementen la eficiencia en el uso del recurso hídrico y mejoren la rentabilidad de los sistemas agrícolas. En este contexto, el objetivo de la presente investigación fue evaluar la viabilidad financiera de la implementación del sistema de riego por goteo subterráneo (SDI) en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en la región centro-sur del estado de Chihuahua. El estudio se desarrolló en una superficie de 8 ha ubicada en el Módulo de Riego No. 2 del Distrito de Riego 005, mediante un enfoque mixto con análisis técnico y financiero. Se estimaron los costos de inversión, operación y mantenimiento del sistema, además de los indicadores Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y periodo de recuperación de la inversión. La inversión inicial para la instalación del SDI fue de \$365,000.00 MXN. Los resultados técnicos mostraron una disminución de la lámina de riego de 1.39 a 0.73 m, equivalente a un ahorro de agua de 47.5 % respecto al sistema convencional. La eficiencia en el uso del agua aumentó de 1.33 a 2.04 kg de materia seca m⁻³, mientras que el rendimiento del cultivo se incrementó de 18.46 a 24.08 t ha⁻¹, lo que representa un aumento aproximado del 30.4 %. El análisis financiero arrojó un VPN de \$131,538.52, una TIR de 32 % y un periodo de recuperación de la inversión de 2.3 años, indicadores que evidencian la rentabilidad del proyecto bajo las condiciones evaluadas. Se concluye que el sistema de riego por goteo subterráneo constituye una alternativa técnica y financieramente viable para la producción de alfalfa en la región centro-sur del estado de Chihuahua, al incrementar la productividad, optimizar el uso del agua y generar beneficios económicos para los productores.

Palabras clave: *Medicago sativa*, riego por goteo subterráneo, eficiencia hídrica, análisis financiero, rentabilidad agrícola.

Abstract

Water scarcity has become one of the major constraints affecting agricultural productivity in arid and semi-arid regions of northern Mexico, highlighting the need to adopt irrigation technologies that improve water use efficiency while maintaining economic profitability. This study aimed to evaluate the financial feasibility of implementing a subsurface drip irrigation (SDI) system for alfalfa (*Medicago sativa* L.)

⁴ Estudiante de posgrado de la Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, Carr. Delicias-Rosales Km. 2.5 Cd. Delicias-Chihuahua.

⁵ Docente de la Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, Carr. Delicias-Rosales Km. 2.5 Cd. Delicias-Chihuahua.

production in the central-southern region of Chihuahua State, Mexico. The research was conducted on an 8-ha commercial field located within Irrigation District 005 using a mixed-method approach that integrated technical and financial analyses. Investment, operation, and maintenance costs were estimated, and financial performance was assessed using Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Payback Period indicators. The initial investment required for SDI installation was **MXN \$365,000.00**. Technical results showed a reduction in irrigation depth from **1.39 to 0.73 m**, representing **47.5% water savings** compared with conventional surface irrigation. Water use efficiency increased from **1.33 to 2.04 kg of dry matter m⁻³**, while forage yield increased from **18.46 to 24.08 t ha⁻¹**, representing an approximate **30.4% yield improvement**. Financial analysis yielded a **Net Present Value (NPV) of MXN \$131,538.52**, an **Internal Rate of Return (IRR) of 32%**, and a **payback period of 2.3 years**, demonstrating the economic attractiveness of the proposed irrigation system. The results indicate that subsurface drip irrigation is both a technically effective and financially feasible alternative for alfalfa production under water-limited conditions in the central-southern region of Chihuahua, contributing to improved water productivity, increased crop yield, and enhanced farm profitability.

Keywords: *Medicago sativa* L., subsurface drip irrigation, water use efficiency, financial feasibility, agricultural profitability.

Introducción

El agua constituye uno de los recursos estratégicos para la producción agrícola y la seguridad alimentaria mundial. Sin embargo, el crecimiento de la demanda, la variabilidad climática y el incremento en la frecuencia e intensidad de las sequías han reducido la disponibilidad de agua para la agricultura, particularmente en las regiones áridas y semiáridas, donde la producción depende en gran medida del riego (Food and Agriculture Organization [FAO], 2023). A nivel global, la agricultura utiliza aproximadamente el 72 % del agua dulce extraída, lo que evidencia la necesidad de implementar tecnologías que incrementen la productividad del agua y mejoren la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (FAO & UN-Water, 2024).

México enfrenta un escenario similar debido a la creciente presión sobre los recursos hídricos. La disminución en la disponibilidad de agua superficial, la sobreexplotación de los acuíferos y la ocurrencia recurrente de sequías representan algunos de los principales factores que limitan el desarrollo agrícola del país (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2024). En el estado de Chihuahua, estas condiciones son aún más críticas debido a su clima predominantemente árido y semiárido, donde la agricultura de riego constituye una actividad económica fundamental para el desarrollo regional. Durante los últimos años, la reducción en los volúmenes almacenados en las presas y las restricciones en la asignación de agua para riego han incrementado la necesidad de optimizar el uso del recurso hídrico mediante tecnologías que permitan mantener la productividad agrícola con menores volúmenes de agua (CONAGUA, 2024).

Dentro de los cultivos estratégicos para la región destaca la alfalfa (*Medicago sativa L.*), considerada el principal forraje para la alimentación del ganado lechero y de carne debido a su elevada producción de biomasa, alto contenido de proteína y excelente valor nutricional. Chihuahua se encuentra entre las principales entidades productoras de alfalfa en México; sin embargo, este cultivo presenta elevados requerimientos hídricos, que pueden superar los 1,200 mm por ciclo productivo dependiendo de las condiciones ambientales y del manejo agronómico (Putnam & Orloff, 2020). Esta característica convierte a la alfalfa en uno de los cultivos más sensibles a la disponibilidad de agua y en un objetivo prioritario para la implementación de estrategias que incrementen la eficiencia del riego.

Tradicionalmente, la producción de alfalfa en la región centro-sur del estado de Chihuahua se realiza mediante sistemas de riego por gravedad, los cuales presentan eficiencias de aplicación relativamente bajas debido a pérdidas por evaporación, escurrimiento superficial e infiltración profunda (Playán & Mateos, 2020). Estas pérdidas no solo incrementan el consumo de agua, sino que también reducen la eficiencia en el uso de fertilizantes y elevan los costos de producción, disminuyendo la competitividad de las unidades agrícolas (Pereira *et al.*, 2021).

Como alternativa tecnológica, el sistema de riego por goteo subterráneo (Subsurface Drip Irrigation, **SDI**) ha demostrado importantes ventajas en diversos cultivos agrícolas al suministrar el agua directamente en la zona radicular, reduciendo las pérdidas por evaporación y mejorando la eficiencia en el uso del agua (Lamm & Camp, 2020). Estudios recientes reportan que esta tecnología puede incrementar la productividad del agua entre 20 y 50 %, además de favorecer mayores rendimientos y una utilización más eficiente de los fertilizantes en comparación con los sistemas tradicionales de riego (Darouich *et al.*, 2021; Pereira *et al.*, 2021).

No obstante, la adopción de tecnologías de riego no depende exclusivamente de sus beneficios agronómicos. Desde la perspectiva de los productores, la decisión de invertir en infraestructura tecnificada está estrechamente relacionada con la rentabilidad económica del proyecto, el tiempo necesario para recuperar la inversión y el riesgo financiero asociado (Gitman *et al.*, 2022). Por ello, la evaluación mediante indicadores como el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el periodo de recuperación constituye una herramienta fundamental para determinar la factibilidad económica de incorporar sistemas de riego presurizado (Ross *et al.*, 2022).

Aunque diversas investigaciones han documentado los beneficios técnicos del riego por goteo subterráneo, en la región centro-sur del estado de Chihuahua existe información limitada sobre su desempeño financiero bajo condiciones reales de producción de alfalfa. La mayor parte de los estudios se han enfocado en la eficiencia del uso del agua o en el rendimiento del cultivo, mientras que son escasos los trabajos que integran indicadores técnicos y financieros para sustentar la toma de decisiones de inversión en tecnologías de riego. Esta falta de evidencia limita la adopción de sistemas tecnificados por parte de los productores y dificulta el diseño de estrategias orientadas a incrementar la competitividad y sostenibilidad del sector agrícola.

En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la viabilidad financiera de la implementación del sistema de riego por goteo subterráneo en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa L.*) en la región centro-sur del estado de Chihuahua, mediante el análisis de los costos de inversión, operación y mantenimiento, así como de los principales indicadores financieros de rentabilidad y de la eficiencia en el uso del agua.

Con base en este objetivo se planteó la siguiente hipótesis de investigación: la implementación del sistema de riego por goteo subterráneo incrementa la eficiencia en el uso del agua y mejora la rentabilidad económica de la producción de alfalfa respecto al sistema de riego convencional, generando indicadores financieros positivos que respaldan su viabilidad en las condiciones productivas de la región centro-sur del estado de Chihuahua.

Materiales y Métodos

Área de estudio. La investigación se realizó durante el ciclo agrícola 2025 en una unidad de producción comercial ubicada en el Módulo de Riego No. 2 del Distrito de Riego 005 Delicias, en la región centro-sur del estado de Chihuahua, México. El sitio experimental se localiza aproximadamente en las coordenadas geográficas 27.8784° N y 105.2921° O. La región presenta un clima seco característico de las zonas áridas del norte de México, donde la agricultura depende principalmente del riego para la producción de cultivos forrajeros.

La unidad experimental comprendió una superficie de 8 ha establecida con alfalfa (*Medicago sativa L.*) variedad Valentina, comercializada por Semillas Berentsen. El cultivo se estableció durante el ciclo agrícola 2025 sobre un suelo clasificado como Cambisol, caracterizado por presentar un desarrollo moderado del perfil y condiciones favorables para la producción agrícola bajo riego.

Diseño de la investigación. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con alcance descriptivo y analítico, mediante un estudio de caso orientado a evaluar la viabilidad financiera del sistema de riego por goteo subterráneo (Subsurface Drip Irrigation, SDI) en comparación con el sistema de riego por gravedad utilizado tradicionalmente en la región.

La evaluación integró variables técnicas relacionadas con la eficiencia en el uso del agua y el rendimiento del cultivo, así como variables económicas asociadas a la inversión, operación y rentabilidad del sistema de riego.

Descripción del sistema de riego. El sistema de riego por goteo subterráneo se instaló utilizando cintilla enterrada a una profundidad de 45 cm respecto a la superficie del suelo. Los goteros presentaron un caudal

nominal de 1.6 L h^{-1} , con una separación de 0.80 m entre emisores, permitiendo distribuir el agua directamente en la zona de mayor actividad radicular del cultivo. Los riegos se realizaron con una frecuencia de 15 días, de acuerdo con los requerimientos hídricos del cultivo y las condiciones climáticas de la región.

Como sistema de referencia se consideró el riego superficial por gravedad, ampliamente utilizado por los productores de alfalfa del Distrito de Riego 005.

Variables evaluadas. Las variables técnicas consideradas fueron:

- Lámina total de riego aplicada (m).
- Eficiencia en el uso del agua (kg de materia seca m^{-3}).
- Rendimiento del cultivo (t ha^{-1}).

Las variables económicas incluyeron:

- Inversión inicial del sistema de riego.
- Costos de operación y mantenimiento.
- Valor Presente Neto (VPN).
- Tasa Interna de Retorno (TIR).
- Periodo de recuperación de la inversión.
- Evaluación técnica

La evaluación técnica consistió en comparar el comportamiento del sistema de riego por goteo subterráneo con el sistema de riego por gravedad, considerando el volumen de agua aplicada, la eficiencia en el uso del agua y el rendimiento del cultivo.

El sistema SDI aplicó una lámina total de riego de 0.73 m, mientras que el sistema convencional requirió 1.39 m, representando un ahorro de agua de aproximadamente 47.5 %. La eficiencia en el uso del agua alcanzó 2.04 kg de materia seca m^{-3} bajo el sistema SDI, superior a los 1.33 kg m^{-3} registrados con riego por gravedad. Asimismo, el rendimiento promedio del cultivo fue de 24.08 t ha^{-1} con riego por goteo subterráneo, mientras que en el sistema convencional se obtuvieron 18.46 t ha^{-1} , lo que representa un incremento de 30.4 % en la productividad.

Evaluación financiera. La viabilidad financiera del sistema de riego se determinó mediante la elaboración de un flujo de efectivo para un horizonte de evaluación de cinco años, considerando la inversión inicial, los costos de operación y mantenimiento, así como los ingresos generados por la producción de alfalfa.

El análisis financiero se realizó utilizando Microsoft Excel®, aplicando una tasa de descuento del 17 %, considerada como la tasa mínima aceptable de rendimiento para el proyecto.

Los indicadores financieros calculados fueron:

- Valor Presente Neto (VPN), para determinar el valor económico generado por el proyecto durante el horizonte de evaluación.
- Tasa Interna de Retorno (TIR), utilizada para estimar la rentabilidad del proyecto y compararla con la tasa mínima aceptable de rendimiento.
- Periodo de recuperación de la inversión (PRI), determinado como el tiempo requerido para recuperar el capital invertido mediante los flujos netos de efectivo generados por el sistema.

Análisis de la información. Los datos técnicos y económicos obtenidos durante la investigación fueron organizados mediante estadística descriptiva. Posteriormente, se integró el análisis de los indicadores productivos y financieros para determinar la factibilidad técnica y económica del sistema de riego por goteo subterráneo en la producción de alfalfa bajo las condiciones de la región centro-sur del estado de Chihuahua.

Resultados

La implementación del sistema de riego por goteo subterráneo (SDI) en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa L.*) permitió obtener mejoras tanto en la eficiencia del uso del agua como en la productividad del cultivo y en los indicadores financieros evaluados. Los resultados evidencian que la tecnificación del riego constituye una alternativa para optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico y fortalecer la rentabilidad de las unidades de producción de la región centro-sur del estado de Chihuahua.

Eficiencia en el uso del agua

La comparación entre el sistema de riego por gravedad y el sistema SDI mostró una reducción importante en la lámina total de riego aplicada. Mientras que el sistema convencional requirió una lámina acumulada de 1.39 m, el sistema de riego por goteo subterráneo utilizó únicamente 0.73 m, lo que representa un ahorro de agua de aproximadamente 47.5 %.

La disminución del volumen de agua aplicada permitió incrementar la eficiencia en el uso del recurso hídrico. El sistema SDI alcanzó una eficiencia de 2.04 kg de materia seca por metro cúbico de agua aplicada, mientras que el sistema convencional obtuvo 1.33 kg m⁻³ (ver cuadro 1). Estos resultados indican que el suministro localizado del agua directamente en la zona radicular favorece un mejor aprovechamiento del recurso, disminuyendo las pérdidas por evaporación superficial, escurrimiento e infiltración profunda.

Cuadro 1. Indicadores de eficiencia hídrica del sistema de riego evaluado.

Variable	Riego por gravedad	Riego por goteo subterráneo
Lámina de riego (m)	1.39	0.73
Ahorro de agua (%)	—	47.5
Eficiencia hídrica (kg MS m ⁻³)	1.33	2.04

Fuente: Elaboración propia con resultados de la investigación

Rendimiento del cultivo

El rendimiento promedio de alfalfa obtenido con el sistema de riego por goteo subterráneo fue de 24.08 t ha⁻¹, superior al registrado con el sistema convencional (18.46 t ha⁻¹). La diferencia corresponde a un incremento aproximado del 30.4 % respecto al sistema de riego por gravedad (ver cuadro 2).

El incremento en la producción de biomasa refleja un mejor aprovechamiento del agua disponible durante el ciclo del cultivo, lo que favoreció el crecimiento vegetativo y permitió alcanzar mayores niveles de productividad.

Cuadro 2. Rendimiento promedio del cultivo de alfalfa.

Sistema de riego	Rendimiento (t ha ⁻¹)
Riego por gravedad	18.46
Riego por goteo subterráneo	24.08
Incremento (%)	30.4

Fuente: Elaboración propia con resultados de la investigación

Evaluación financiera

La inversión requerida para la instalación del sistema de riego por goteo subterráneo fue de \$365,000.00 MXN. (Se considera que el productor se encarga personalmente del trabajo de la tierra, la maquila y la instalación). El análisis financiero se realizó considerando un horizonte de evaluación de cinco años y una tasa de descuento del 17 % (ver cuadro 3).

Cuadro 3. Flujo de efectivo acumulado durante los cinco años de evaluación.

Año	Inversión	Costos operativos	Costos mantenimiento	Costos totales	Ventas	Flujo Neto
0	\$365,000					

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
División de Ciencias Económico-Administrativas
Universidad Autónoma Chapingo
15 y 16 de Octubre 2025

1	\$0	\$46,800	\$6,000	\$52,800	\$208,000	\$155,200
2	\$0	\$46,800	\$6,000	\$52,800	\$208,000	\$155,200
3	\$0	\$46,800	\$6,000	\$52,800	\$208,000	\$155,200
4	\$0	\$46,800	\$6,000	\$52,800	\$208,000	\$155,200
5	\$0	\$46,800	\$6,000	\$52,800	\$208,000	\$155,200

Los resultados obtenidos muestran un Valor Presente Neto (VPN) de \$131,538.52, lo que indica que los beneficios económicos generados durante el periodo de evaluación superan los costos de inversión y operación del sistema. Asimismo, la Tasa Interna de Retorno (TIR) fue de 32 %, valor superior a la tasa mínima aceptable de rendimiento utilizada en la evaluación, lo que confirma la rentabilidad económica del proyecto. El periodo de recuperación de la inversión fue de 2.3 años, indicando que el capital invertido puede recuperarse antes de concluir el horizonte de evaluación financiera (ver cuadro 4).

Cuadro 4. Indicadores financieros del sistema de riego por goteo subterráneo.

Indicador	Resultado
Inversión inicial (MXN)	\$365,000.00
Valor Presente Neto (VPN)	\$131,538.52
Tasa Interna de Retorno (TIR)	32 %
Tasa de descuento	17 %
Horizonte de evaluación	5 años
Periodo de recuperación	2.3 años

Fuente: Elaboración propia con resultados de la investigación

Integración de los resultados

La implementación del sistema de riego por goteo subterráneo (RGS) permitió reducir significativamente la lámina de agua aplicada, sin afectar el desarrollo y la productividad del cultivo; por el contrario, favoreció un mayor aprovechamiento del recurso hídrico y un incremento en la producción de biomasa. La lámina de riego se redujo de 1.39 m bajo riego por gravedad a 0.73 m mediante RGS, lo que representa un ahorro de agua de 47.5 %. Asimismo, la eficiencia en el uso del agua aumentó de 1.33 a 2.04 kg de materia seca m⁻³, equivalente a un incremento de 53.4 %, mientras que la producción anual se incrementó de 39.46 a 52.08 t ha⁻¹, lo que representa un aumento de 32.0 %. En conjunto, estos resultados evidencian el potencial del RGS para mejorar simultáneamente la eficiencia en el uso del agua y la productividad del cultivo, generando condiciones favorables para la viabilidad económica del sistema, reflejados en un VPN positivo, una TIR superior a la tasa de descuento y un periodo de recuperación relativamente corto (ver cuadro 5).

Cuadro 5. Comparación de la lámina de riego, eficiencia hídrica y rendimiento entre el riego por gravedad y el SDI.

Aspecto	Riego por gravedad	Riego por goteo subterráneo (RGS)
Producción (ton/ha anual)	39.46	52.08
Número de pacas (50 kg)	789.2	1041.6
Lámina de agua aplicada	1.39 m	0.73 m
Eficiencia uso agua-Materia seca	1.33 kg materia seca/m ³	2.04 kg materia seca/m ³
Consumo energético	Mayor, por mayores presiones	Menor, presiones entre 8-20 psi
Profundidad de riego	Superficial	15 - 45 cm, directamente en raíz
Separación de cintas	No aplica	Aproximadamente 0.8 m
Caudal típico goteros	No aplica	1.6 litros por hora
Ventajas adicionales	Sistema conocido, bajo costo inicial	Mayor uniformidad, menor evaporación, reducción de malezas, riego durante cortes.

Fuente: Elaboración propia con resultados de la investigación

En conjunto, estos resultados muestran que la tecnificación del riego mediante SDI no solo mejora el desempeño productivo del cultivo de alfalfa, sino que también genera condiciones económicas favorables para su adopción en la región centro-sur del estado de Chihuahua.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la presente investigación demuestran que la implementación del sistema de riego por goteo subterráneo (Subsurface Drip Irrigation, SDI) constituye una alternativa técnica y económicamente viable para la producción de alfalfa (*Medicago sativa L.*) en la región centro-sur del estado de Chihuahua. La reducción del volumen de agua aplicada, el incremento en la eficiencia hídrica, el aumento del rendimiento y los indicadores financieros favorables evidencian el potencial de esta tecnología para contribuir a una agricultura más competitiva y sostenible en regiones con limitada disponibilidad de agua.

Uno de los principales hallazgos del estudio fue la disminución de la lámina de riego de 1.39 m en el sistema convencional a 0.73 m mediante SDI, equivalente a un ahorro aproximado del 47.5 % del agua aplicada. Este resultado confirma que el suministro localizado del agua directamente en la zona radicular reduce significativamente las pérdidas por evaporación, escurrimiento superficial y percolación profunda, incrementando la eficiencia del uso del recurso hídrico. Estos resultados coinciden con los reportados por Lamm y Camp (2020), quienes documentaron que el riego por goteo subterráneo puede reducir entre 30 y

50 % el volumen de agua aplicado en cultivos extensivos sin afectar la productividad. De manera similar, Pereira *et al.* (2021) señalaron que la eficiencia del riego localizado depende de la distribución uniforme de la humedad en el perfil del suelo y de una programación adecuada de los riegos, condiciones que favorecen un mayor aprovechamiento del agua por las plantas.

El incremento de la eficiencia en el uso del agua, de 1.33 a 2.04 kg de materia seca m^{-3} , representa una mejora cercana al 53 %, resultado que confirma que la productividad del agua constituye uno de los principales beneficios derivados de la tecnificación del riego. La FAO (2023) destaca que el incremento de la productividad hídrica es una estrategia prioritaria para garantizar la sostenibilidad de la agricultura en regiones áridas, donde la disponibilidad del recurso limita el crecimiento de la producción agrícola. Asimismo, Darouich *et al.* (2021) concluyen que los sistemas de riego subterráneo favorecen una mayor eficiencia fisiológica del cultivo al mantener niveles adecuados de humedad en la rizósfera y reducir el estrés hídrico durante las etapas de mayor demanda de agua.

Desde el punto de vista agronómico, el incremento del rendimiento de 18.46 a 24.08 t ha^{-1} , equivalente a un aumento aproximado del 30.4 %, refleja una respuesta positiva del cultivo a la aplicación localizada del agua. Diversos estudios han demostrado que la alfalfa presenta una elevada sensibilidad a las variaciones en la disponibilidad hídrica debido a su alta tasa de transpiración y a la continua producción de biomasa durante el ciclo de cultivo. En este sentido, Putnam y Orloff (2020) señalan que la uniformidad en el suministro de agua favorece el crecimiento vegetativo, incrementa la producción de forraje y mejora la eficiencia en la absorción de nutrientes. Resultados similares fueron reportados por Ayars *et al.* (2015) y más recientemente por Li *et al.* (2024), quienes observaron incrementos significativos en el rendimiento y en la productividad del agua en sistemas de alfalfa manejados con riego por goteo subterráneo en comparación con métodos tradicionales de riego.

El comportamiento observado en la presente investigación también puede explicarse por el efecto del SDI sobre la dinámica del agua en el suelo. La aplicación continua y localizada mantiene una humedad relativamente estable en la zona de exploración radicular, favoreciendo el desarrollo del sistema radical y reduciendo las pérdidas de agua por evaporación superficial. Kisekka *et al.* (2022) indican que esta condición mejora la disponibilidad de agua y nutrientes durante el crecimiento del cultivo, incrementando la eficiencia fotosintética y la acumulación de materia seca. De igual forma, Raes *et al.* (2023) destacan que los sistemas de riego localizado permiten un manejo más preciso del agua, aspecto particularmente importante bajo escenarios de cambio climático y creciente escasez hídrica.

Desde la perspectiva económica, los resultados obtenidos confirman la viabilidad financiera del sistema de riego por goteo subterráneo. El Valor Presente Neto de \$131,538.52, la Tasa Interna de Retorno de 32 % y un periodo de recuperación de la inversión de 2.3 años indican que la inversión inicial puede recuperarse en un periodo relativamente corto, generando beneficios económicos superiores al costo de oportunidad del capital representado por la tasa de descuento del 17 %. De acuerdo con Gitman *et al.* (2022), un VPN positivo refleja la creación de valor económico para el inversionista, mientras que una TIR superior a la tasa mínima aceptable de rendimiento confirma la conveniencia financiera del proyecto. En el mismo

sentido, Ross *et al.* (2022) establecen que la combinación de un VPN positivo y una TIR superior al costo de capital constituye uno de los criterios más sólidos para aceptar proyectos de inversión agrícola.

La rentabilidad observada en este estudio coincide con investigaciones recientes sobre evaluación económica de tecnologías de riego. Fereres y Soriano (2022) señalan que, aunque los sistemas presurizados requieren mayores inversiones iniciales, los beneficios derivados del ahorro de agua, la reducción de costos de operación y el incremento de la productividad permiten recuperar la inversión en periodos relativamente cortos. Asimismo, Li *et al.* (2024) reportaron que la adopción de SDI en cultivos forrajeros incrementó significativamente el margen neto de los productores debido a la combinación de mayores rendimientos y una reducción en el consumo de agua.

En el contexto agrícola del estado de Chihuahua, donde la disponibilidad del agua constituye el principal factor limitante para la producción agrícola, los resultados obtenidos adquieren especial relevancia. La región centro-sur concentra una importante superficie destinada a la producción de alfalfa para abastecer la industria lechera, actividad que demanda grandes volúmenes de agua y enfrenta restricciones crecientes derivadas de la disminución de las reservas superficiales y subterráneas. En este escenario, la implementación de tecnologías que incrementen la productividad por unidad de agua aplicada representa una estrategia para fortalecer la sostenibilidad del sector agropecuario y mejorar la resiliencia de los sistemas productivos frente al cambio climático (FAO & UN-Water, 2024; CONAGUA, 2024).

Finalmente, si bien los resultados evidencian la viabilidad técnica y financiera del sistema de riego por goteo subterráneo, es importante considerar que la rentabilidad del proyecto puede variar en función de factores como el precio de la alfalfa, el costo de la energía, las condiciones de financiamiento y la vida útil del sistema. Por ello, futuras investigaciones deberían incorporar análisis de sensibilidad y escenarios económicos que permitan evaluar el comportamiento de los indicadores financieros ante variaciones en las condiciones del mercado y en la disponibilidad del recurso hídrico. Asimismo, sería pertinente evaluar el efecto de la fertirrigación y del manejo de diferentes láminas de riego sobre la productividad y la rentabilidad del cultivo, con el propósito de optimizar el desempeño del sistema bajo las condiciones agroclimáticas del norte de México.

Conclusiones

La implementación del sistema de riego por goteo subterráneo en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa L.*) demostró ser una alternativa técnica y financieramente viable para las condiciones de producción de la región centro-sur del estado de Chihuahua. Los resultados obtenidos permitieron cumplir el objetivo de la investigación al evidenciar que la tecnificación del riego mejora significativamente la eficiencia en el uso del agua, incrementa la productividad del cultivo y genera beneficios económicos que justifican la inversión inicial.

Desde el punto de vista técnico, el sistema de riego por goteo subterráneo redujo la lámina de riego de 1.39 a 0.73 m, lo que representó un ahorro de agua de aproximadamente 47.5 % respecto al riego por gravedad. Asimismo, la eficiencia en el uso del agua aumentó de 1.33 a 2.04 kg de materia seca m^{-3} , mientras que el rendimiento promedio del cultivo se incrementó de 18.46 a 24.08 t ha^{-1} , equivalente a un aumento cercano al 30.4 %. Estos resultados demuestran que el suministro localizado del agua favorece un mejor aprovechamiento del recurso hídrico y contribuye al incremento de la productividad agrícola.

El análisis financiero confirmó la rentabilidad de la inversión, al obtener un Valor Presente Neto (VPN) de \$131,538.52, una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 32 %, superior a la tasa de descuento del 17 %, y un periodo de recuperación de la inversión de 2.3 años. Estos indicadores evidencian que el sistema genera beneficios económicos suficientes para recuperar el capital invertido en un plazo relativamente corto, reduciendo el riesgo financiero asociado con la adopción de tecnologías de riego presurizado.

Con base en los resultados obtenidos, se acepta la hipótesis de investigación, al demostrarse que la implementación del sistema de riego por goteo subterráneo incrementa la eficiencia en el uso del agua y mejora la rentabilidad económica de la producción de alfalfa en comparación con el sistema de riego por gravedad. En consecuencia, esta tecnología representa una alternativa estratégica para fortalecer la competitividad de las unidades de producción, promover un uso más eficiente del recurso hídrico y contribuir a la sostenibilidad de la agricultura de riego en la región centro-sur del estado de Chihuahua.

Finalmente, se recomienda ampliar futuras investigaciones mediante la evaluación del sistema en diferentes tipos de suelo, variedades de alfalfa y condiciones climáticas, así como incorporar análisis de sensibilidad económica que consideren variaciones en los costos de producción, el precio del forraje y la disponibilidad de agua. Esto permitirá fortalecer la toma de decisiones para la adopción de tecnologías de riego eficiente y el diseño de políticas públicas orientadas a la gestión sostenible del agua en la agricultura.

Literatura Citada

Libros

Avila, A. (2011). El agua en la frontera México-Estados Unidos, un asunto de seguridad nacional. En U. Oswald (Coord.), Retos de la investigación del agua en México (pp. 467–481). Universidad Nacional Autónoma de México.

Comisión Nacional del Agua. (2003). Estadísticas del agua en México. Comisión Nacional del Agua.

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
División de Ciencias Económico-Administrativas
Universidad Autónoma Chapingo
15 y 16 de Octubre 2025

Godoy, A. C., & Reyes, I. (2004). Fertilización en alfalfa. En Memorias de la XVI Semana Internacional de Agronomía FAZ-UJED (pp. 212–216). Facultad de Agricultura y Zootecnia, Universidad Juárez del Estado de Durango.

INEGI. (2017). Conociendo Chihuahua. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Jiménez, G. (2008). El valle de Delicias en la Cuenca del río Conchos. Boletín del Archivo Histórico del Agua, 13(38), 27–35.

Lara-Macías, C. R., & Jurado-Guerra, P. (2014). Paquete tecnológico para producir alfalfa en el estado de Chihuahua. Centro de Investigación Regional Norte Centro, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

Liotta, M. (2015). Manual de captación: riego por goteo. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

Lloyd, L. (2006). Las colonias mormonas porfiristas de Chihuahua: ¿Un proyecto de vida comunitaria alterna? En Xenofobia y xenofilia en la historia de México: siglos XIX y XX. Homenaje a Moisés González Navarro. Secretaría de Gobernación/Instituto Nacional de Migración.

Muñoz, R. C., & Núñez, L. D. (2005). ¿Contribuye el monitoreo de la sequía a mitigar sus efectos? En Educación ecológica: Reflexión y praxis en torno a la sequía en Chihuahua (p. 190). Instituto de Ecología, A. C.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2022). Agroecología y eficiencia en el uso de recursos. FAO.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). Monografía de la alfalfa. Gobierno de México.

Rivera-González, M., Estrada, J., Orona, I., & Sánchez, I. (2014). Producción de alfalfa con riego por goteo subsuperficial o subterráneo. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

Revistas

Ayars, J. E., Fulton, A., & Taylor, B. (2015). Subsurface drip irrigation in California—Here to stay? *Agricultural Water Management*, 157, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.001>

Nava Rosillón, M. A. (2009). Análisis financiero: una herramienta clave para una gestión financiera eficiente. *Revista Venezolana de Gerencia*, 14(48), 606–628.

Olvera-Salgado, M. D., Bahena-Delgado, G., Alpuche-Garcés, Ó., & García-Matías, F. (2014). La tecnificación del riego ante la escasez del agua para la generación de alimentos. Estudio de caso en Chihuahua, México. *Ambiente y Desarrollo*, 18(35), 23–36.

Rendón, E. C., León, S. S., & Armendáriz, G. M. (2020). Problemáticas socioambientales en torno al agua utilizada para actividades agrícolas en cinco municipios del estado de Chihuahua, México. *Sociedad y Ambiente*, 23, 1–25.

Paginas electrónicas

Academia de Riego Kilimo. (2022). Aspectos claves para el funcionamiento del riego por goteo subterráneo. Kilimo. <https://academiaderiego.kilimo.com/informe-aspectos-claves-para-el-funcionamiento-del-riego-por-goteo-subterraneo/>

Analytics Financial. (2023). What is financial analytics? Actian. <https://www.actian.com/es/what-is-financial-analytics/>

Axayacatl, O. (2024). ¿Por qué el riego por goteo es una tecnología novedosa? Netafim México. <https://www.netafim.com.mx/blog/>

Azud Industrial. (2024). Riego por goteo subterráneo: aplicaciones y ventajas. AZUD. <https://azud.com/aplicacion/riego-por-goteo-subterraneo/>

Banco Mundial. (2022). Agua en la agricultura. Banco Mundial. <https://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture>

Bridge Capital. (2025). Calidad del agua y producción de alfalfa. Bridge Capital. <https://ibridgecapital.org/es/calidad-del-agua-alfalfa/>

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
División de Ciencias Económico-Administrativas
Universidad Autónoma Chapingo
15 y 16 de Octubre 2025

BBC News Mundo. (2023). La sequía y la crisis del agua en México. BBC. <https://www.bbc.com/mundo/>

Cenicaña. (2015). Riego por surcos. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. <https://www.cenicana.org/riego-por-surcos/>

Clark, J. (2024). Fixed vs. variable costs of farming. University of Wisconsin-Madison Extension. <https://farms.extension.wisc.edu/articles/fixed-vs-variable-costs-of-farming/>

COFEPASA. (2020). Alfalfa: beneficios y cultivo. <https://cofepasa.com/alfalfa-beneficios-y-cultivo/>

Comisión Nacional del Agua. (2024). Estadísticas del agua en México. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua>

Comunicación Social. (2022). Sequía afecta disponibilidad de agua para actividades agrícolas en Chihuahua. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). Gobierno de México. <https://www.gob.mx/senasica>

Contreras-García, J. A. (2021). Punto de equilibrio: qué es y cómo calcularlo. Salesforce LATAM. <https://www.salesforce.com/mx/blog/punto-de-equilibrio/>

Cortez-Lara, A. (2020). Sequía, aumento de áreas de cultivo y robo de agua: principales problemáticas en Chihuahua. El Colegio de la Frontera Norte. <https://www.colef.mx/>

Delgado Martorell, S. (2022). ¿En qué consiste el riego por inundación? Prismab. <https://prismab.com/blog/en-que-consiste-el-riego-por-inundacion/>

ECOEMBES. (2024). Economía ecológica: principios y beneficios ambientales. <https://reducereutilizarecicla.org/economia-ecologica/>

Economipedia. (2025). Rentabilidad: qué es y cómo se calcula. <https://economipedia.com/definiciones/rentabilidad.html>

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
División de Ciencias Económico-Administrativas
Universidad Autónoma Chapingo
15 y 16 de Octubre 2025

Equipo CFI. (2025). Net present value (NPV): fórmula y cálculo. Corporate Finance Institute. <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/valuation/npv-formula/>

Fernández-De la Cigoña, J. R. (2025). Tasa interna de retorno (TIR): qué es y cómo se calcula. Sage. <https://www.sage.com/es-es/blog/tasa-interna-de-retorno-tir-que-es-y-como-se-calcula/>

Fundación Aquae. (2021). El riego y los cultivos: importancia del uso eficiente del agua. <https://www.fundacionaquae.org/el-riego-y-los-cultivos/>

García, G. (2021). Riego inteligente, tendencia que evoluciona el sector agrícola. The Food Tech. <https://thefoodtech.com/>

Gasbarrino, S. (2023). Valor presente neto: qué es y cómo calcularlo. HubSpot. <https://blog.hubspot.es/sales/que-es-valor-presente-neto>

Gobierno de México. (2024). Monografía de la alfalfa. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/agricultura>

Gobierno del Estado de Chihuahua. (2021). Chihuahua líder nacional en producción agrícola de diversos alimentos. <https://chihuahua.gob.mx/>

Hernández, Y. (2022). Análisis de viabilidad financiera: qué es y cómo realizarlo. Xepelin. <https://xepelin.com/blog/educacion-financiera/analisis-viabilidad-financiera>

iAgua. (2024). Tipos de sistemas de riego agrícola. <https://www.iagua.es/>

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2019). Conservación de infraestructura para riego en el campo. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/imta>

INTAGRI. (2017). Sistema radical o sistema radicular de los cultivos. <https://www.intagri.com/articulos/suelos/sistema-radical-o-sistema-radicular>

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
División de Ciencias Económico-Administrativas
Universidad Autónoma Chapingo
15 y 16 de Octubre 2025

Jason, F. (2025). Internal rate of return (IRR): definition and formula. Investopedia. <https://www.investopedia.com/terms/i/irr.asp>

KILIMO. (2022). Aspectos claves del riego por goteo subterráneo. Academia de Riego Kilimo. <https://academiaderiego.kilimo.com/>

Mata, M. (2024). Chihuahua enfrenta riesgos para el ciclo agrícola por disponibilidad de agua. El Heraldo de Chihuahua. <https://www.elheraldodechihuahua.com.mx/>

Metzer. (2024). Subsurface drip irrigation system for row crops and orchards. <https://www.metzer-group.com/subsurface-drip-irrigation-sdi-for-orchards-row-crops/>

Mottech Water Management. (2022). New vs. traditional irrigation systems: evolution and comparison. <https://mottech.com/>

NOVAGRIC. (2023). Diseño de sistemas de riego agrícola. <https://www.novagric.com/>

PROAIN Tecnología Agrícola. (2020). La humedad del suelo en la agricultura. <https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/la-humedad-del-suelo-en-la-agricultura>

Productos Agrícolas Servicios del Agro. (2020). Cálculo de rentabilidad agrícola. AgroSpray. <https://agrospray.com.ar/blog/calculo-de-rentabilidad-agricola/>

Real Academia Española. (2023). Alfalfa. Diccionario de la lengua española. <https://dle.rae.es/alfalfa>

RIVULIS. (2024). Riego enterrado: sistemas de goteo subterráneo. <https://es.rivulis.com/crop/riego-enterrado/>

Ruiz, I. (2022). Chihuahua perdería producción agrícola por falta de agua. INTAGRI. <https://www.intagri.com/>

Rus-Arias, E. (2025). Punto de equilibrio. Economipedia. <https://economipedia.com/definiciones/punto-de-equilibrio.html>

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
División de Ciencias Económico-Administrativas
Universidad Autónoma Chapingo
15 y 16 de Octubre 2025

Sánchez Galán, J. (2020). Gastos de instalación: definición y características. Economipedia. <https://economipedia.com/>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). La producción en zonas áridas de México. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/agricultura>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2023). Cultivando el futuro: agricultura sostenible y sustentable. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/agricultura>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2018). En la agricultura los sistemas de riego son utilizados para un aprovechamiento óptimo del agua. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/siap>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2023). Sistemas de riego tecnificados: un antes y un después. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/siap>

Sifuentes-Ibarra, E. (2023). Metodología para la eficiencia de aplicación del riego en parcela. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. <https://www.gob.mx/inifap>

SIIGO. (2015). Qué es un costo en contabilidad. <https://www.siigo.com/blog/empresario/que-es-un-costo-en-contabilidad/>

SoilSense. (2024). Field capacity: what it is and why it is important. <https://soilsense.io/>

Sutton, N. (2024). Mastering budget control: why it matters and how technology can help. OneAdvanced. <https://www.oneadvanced.com/>

TOTVS LATAM. (2022). Productividad agrícola: factores que influyen y cómo optimizarla. <https://es.totvs.com/blog/>

Universidad Europea. (2025). Ratios financieros: qué son y para qué sirven. <https://universidadeuropea.com/>

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
División de Ciencias Económico-Administrativas
Universidad Autónoma Chapingo
15 y 16 de Octubre 2025

Universidad Politécnica de Madrid. (2024). Estados financieros: qué son y por qué son importantes.
<https://ienupm.com/>

Vasyl, C. (2025). Cultivo de alfalfa: características, manejo y producción. EOS Data Analytics.
<https://eos.com/es/blog/cultivo-de-alfalfa/>

Modelo de Negocio de una Microempresa Proveedora de Herramientas para la Gestión del Agua

Fuentes Lozada José Guadalupe⁶, Olivares Gutiérrez Romel, Cuevas Alvarado Cristóbal.

1. DATOS DE IDENTIFICACIÓN Y RESUMEN

Resumen

A pesar de la pertinencia social de las soluciones hídricas frente al estrés hídrico actual, la microempresa I, P&G presenta una marcada inestabilidad financiera derivada de deficiencias estructurales en su gestión administrativa y comercial. Esta investigación evalúa la factibilidad de una reingeniería integral basada en una propuesta de innovación estratégica. Se empleó una metodología mixta que integró el análisis estadístico de la facturación histórica (2014-2024) y herramientas de diagnóstico cualitativo: Modelo CANVAS, Red de Valor de Allee, Análisis FODA, Árbol de Problemas y la Matriz ERIC. Los resultados diagnósticos revelan que la centralización unipersonal y la ausencia de controles internos generan crisis recurrentes, a pesar de picos de ingresos superiores a los \$1.2 millones de pesos en 2021. La propuesta de innovación, centrada en la digitalización de procesos y la formalización orgánica, requiere una inversión de \$207,036.00. La evaluación financiera (VAN, TIR, B/C) confirmó la rentabilidad y pertinencia de la estrategia, validando la hipótesis de que la innovación estratégica y el control digital garantizan la estabilidad y el crecimiento resiliente. Se concluye que la profesionalización orgánica es imperativa para la supervivencia de la entidad.

Palabras clave: Gestión del agua, Microempresa, Innovación estratégica, Herramientas digitales, Análisis financiero.

Abstract

Despite the social relevance of water management solutions in the current context of hydric stress, the microenterprise I, P&G exhibits significant financial instability due to structural deficiencies in its administrative and commercial management. This research evaluates the feasibility of a comprehensive reengineering process based on a strategic innovation proposal. A mixed methodological approach was employed, integrating statistical analysis of historical billing (2014-

⁶ Universidad Autónoma Chapingo / Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial (CIESTAAM)

2024) with qualitative diagnostic tools: the CANVAS Model, Allee's Value Network, SWOT Analysis, Problem Tree, and the E-R-I-C Matrix. Diagnostic results reveal that unipersonal centralization and the lack of internal controls lead to recurrent crises, notwithstanding revenue peaks exceeding \$1.2 million MXN in 2021. The innovation proposal, focused on process digitalization and organic formalization, requires an investment of \$207,036.00. Financial evaluation (NPV, IRR, B/C) confirmed the profitability and pertinence of the strategy, validating the hypothesis that strategic innovation and digital control ensure stability and resilient growth. It is concluded that organic professionalization is imperative for the entity's survival.

Keywords: Water management, Microenterprise, Strategic innovation, Digital tools, Financial analysis.

INTRODUCCIÓN

Problema de Investigación

La microempresa Impermeabilizaciones, Plásticos y Geomembranas (I, P&G) enfrenta una paradoja operativa: una oferta de valor altamente pertinente en un entorno de inseguridad hídrica y variabilidad climática, frente a una gestión interna deficiente que compromete su permanencia. Entre 2014 y 2024, la trayectoria financiera de la empresa ha mostrado fluctuaciones críticas, pasando de picos de ingresos cercanos a los \$1.3 millones de pesos a caídas drásticas que amenazan su liquidez. Esta inestabilidad no obedece a la falta de mercado, sino a una estructura reactiva y centralizada que carece de mecanismos para capturar valor de manera constante.

La investigación se fundamenta en la adaptación de la pirámide de Maslow al contexto empresarial, donde se busca que la organización trascienda la mera supervivencia para alcanzar niveles de seguridad, reconocimiento y autorrealización de sus propietarios. La reingeniería propuesta se articula en tres dimensiones: interna (eficiencia de procesos), comercial (segmentación asertiva de clientes) y estratégica (vinculación con macrotendencias como el Plan Nacional Hídrico 2024-2030 y los ciclos largos de Kondratieff).

El objetivo general es determinar la factibilidad técnica y económica de dicha reingeniería mediante un diagnóstico integral de sus riesgos y oportunidades competitivas.

La hipótesis central sostiene que la reingeniería de I, P&G, fundamentada en la innovación estratégica y la implementación de herramientas digitales de control, garantiza la estabilidad financiera y el crecimiento sostenido.

MATERIALES Y MÉTODOS

Procedimiento Detallado. Se adoptó un enfoque de investigación mixto para capturar la complejidad de la gestión microempresarial.

- **Análisis Cuantitativo:** Se procesó la base de datos de facturación electrónica (diciembre 2014 - octubre 2024) utilizando estadística descriptiva en Microsoft Excel para caracterizar el comportamiento histórico de los ingresos, el tamaño de la empresa y la composición del portafolio.
- **Análisis Cualitativo:** Se aplicaron herramientas de diagnóstico estratégico: el Modelo CANVAS para el lienzo histórico, la Red de Valor de Allee para mapear interacciones con proveedores y complementadores, y la Matriz FODA para identificar capacidades internas. El Árbol de Problemas permitió jerarquizar las causas raíz de la inestabilidad, mientras que la Matriz ERIC (Eliminar, Reducir, Incrementar, Crear) sirvió para diseñar la propuesta de innovación.
- **Evaluación Financiera:** La factibilidad económica se calculó mediante indicadores de rentabilidad, Rel. B/C, VAN y TIR con las ecuaciones siguientes:

○ Relación
$$\frac{\sum_{t=1}^{t=n} \frac{B_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^{t=n} \frac{C_t}{(1+i)^t}} =$$

Donde: B_t = Beneficio en cada año; C_t = Costo en cada año; $t = 1, 2, \dots, n$; n = número de años

○ El Valor Actual Neto =

$$\sum_{t=1}^{t=n} \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t}$$

Donde: B_t = Beneficio en cada año; C_t = Costo en cada año; $t = 1, 2, \dots, n$; n = número de años; i = tasa de interés (actualización)

- La Tasa Interna de Retorno =

$$\sum_{t=1}^{t=n} \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} = 0$$

Donde: B_t = Beneficio en cada año; C_t = Costo en cada año; $t = 1, 2, \dots, n$; n = número de años; i = tasa de interés (actualización)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diagnóstico de la Trayectoria

I, P&G se clasifica como una microempresa familiar con menos de 10 empleados. El análisis de ingresos (2014-2024) muestra picos significativos, como los \$1,236,105.00 alcanzados en 2021, seguidos de retrocesos hasta los \$446,000.00 en 2023. Esta dinámica evidencia una operación dependiente de contratos eventuales y una vulnerabilidad extrema ante la falta de una estrategia de mercadeo constante.

Contexto Regional y Particularidades Técnicas La operatividad de la empresa se despliega en el Altiplano Central de México, enfrentando desafíos geológicos y técnicos diferenciados:

- **CDMX y Zona Metropolitana:** Asentada sobre suelos arcillosos, la extracción masiva de agua genera hundimientos y fracturamiento de tuberías, con pérdidas de hasta el 40% del caudal. La demanda se centra en mantenimiento de infraestructura hidráulica urbana y techumbres.
- **Pachuca:** A diferencia de la CDMX, posee suelos tepetatosos con alta carga estructural. Sin embargo, la falta de tanques de distribución obliga a presurizar la red, provocando envejecimiento prematuro y abrasión por arenas presentes en el caudal debido al abatimiento del acuífero.
- **Valle de Tulancingo y Mezquital:** En Tulancingo, la sobreexplotación del acuífero 1317 (déficit de 20 millones de m³) impulsa la demanda de invernaderos. En el Mezquital, la gestión de 43.25 m³/s de aguas residuales y el potencial de 8 mil millones de pesos en biosólidos estabilizados abren nichos para tecnificación de riego y biofábricas.

Análisis FODA y Árbol de Problemas

El diagnóstico estratégico sintetizado revela que la principal Fortaleza de la empresa (29 años de experiencia técnica) puede mitigar la Amenaza de inseguridad pública mediante la construcción de redes de confianza digital. No obstante, la Debilidad crítica es la falta de estructura orgánica. La centralización unipersonal de decisiones impide que la empresa aproveche Oportunidades como el Plan Nacional Hídrico 2024-2030, que demanda proveedores profesionalizados para la tecnificación de los Distritos de Riego.

Propuesta de Innovación Estratégica (Matriz ERIC) La estrategia propuesta se articula en la eliminación de la estructura jerárquica informal para transitar hacia una organización por procesos. Se incrementará la capacidad de respuesta mediante las herramientas digitales detalladas en el cuadro No. 1, que reduzcan los costos ocultos por falta de controles de inventarios, del patrimonio y de una proyección comercial.

Cuadro 1. Costo de elementos para la gestión de procesos con herramientas digitales

Componente de Inversión	Descripción	Costo Estimado (\$)
Control de Inventarios	Sistema de registro y seguimiento de materiales	\$34,500.00
Monitoreo de Activo Fijo	Control de herramientas, maquinaria y vehículos	\$28,700.00
Diseño y Alojamiento Web	Presencia digital y catálogo interactivo	\$15,600.00
Centro Digital de Ventas	CRM para atención personalizada y seguimiento	\$42,236.00
Campaña de Marketing	Posicionamiento en buscadores y redes sociales	\$36,000.00
Red de Colaboración	Herramientas digitales para asociados y ventas	\$50,000.00
Total de inversión		\$ 207,036.00

Fuente: Elaboración propia con datos de cotizaciones de mercado y simulación operativa.

Evaluación Financiera.

La primer corrida financiera generó los siguientes resultados:

Un valor obtenido de la **relación Beneficio/Costo (B/C)**: es de 1.13, por peso invertido, se conserva el valor de cada peso invertido y se genera un beneficio adicional de \$0.13.

El **Valor Actual Neto (VAN)**: **\$274,529.38**, valor que significa que la actividad evaluada es rentable, porque el importe es superior a cero, la empresa ganará ese importe ya descontando el costo del dinero (12%) en los diez años evaluados.

Y la **Tasa Interna de Rentabilidad (TIR)**: de **15%** anual, lo que significa que la empresa obtendrá una ganancia del 15% sobre el importe invertido.

Si bien existen actividades similares en el sector con mejor comportamiento de este indicador, como en la construcción de invernaderos con una TIR que oscila entre el 33% y el 44% calculada por Laura Gisela Alvarado Chávez (Alvarado Ch., L. G., 2025) en su “Diseño y evaluación de una estrategia de fortalecimiento para una empresa en el sector de la agricultura protegida”; para I, P&G el beneficio de la inversión se asocia a la propiedad de la empresa del activo fijo, que no tendría equivalente en recursos monetarios si vendiera sus componentes para que el importe de lo obtenido lo invirtiera en otra actividad.

La simulación de la inversión de \$207,036.00 frente a la proyección de ingresos derivada de una mayor eficiencia operativa mostró indicadores de rentabilidad positivos. El flujo de efectivo proyectado permite superar el "océano rojo" de la competencia por precio, posicionando a I, P&G en un nicho de especialización técnica y digital. La inversión se justifica plenamente al reducir el riesgo de pérdida patrimonial por pérdida de valor de los activos.

CONCLUSIONES

Aportaciones

Se validó la factibilidad técnica y financiera de la reingeniería propuesta. La innovación estratégica no solo es rentable, sino que constituye el único camino para transformar a I, P&G de una unidad de supervivencia a una microempresa competitiva en el mercado de la gestión hídrica.

Hallazgos Clave

La formalización de una estructura orgánica y la implementación de controles internos digitales (inventarios, costos y activos) son imperativos para romper la centralización operativa. Estos mecanismos actúan como blindaje ante la variabilidad del mercado y garantizan que la experiencia acumulada de casi tres décadas se traduzca en una estabilidad financiera que asegure la continuidad de la empresa.

LITERATURA CITADA

Libros

Brandenburger, A. M., & Nalebuff, B. J. (2011). *Co-opetition* . New York: Currency Doubleday.

Christensen, M. C., & Raynor, M. (2023). *La solución de los innovadores: Estrategias para desbloquear una innovación disruptiva exitosa* . México: Harvard Business Review Press.

Gittinger, J. P. (1983). *Análisis económico de proyectos agrícolas* . España: Editorial Tecnos.

Kim, W. C., & Mauborgne, R. (2005). *La estrategia del océano azul* . España: Profit Editorial. Maslow, A. H. (1991). *Motivación y personalidad* . España: Ediciones Díaz de Santos.

Osterwalder, A., & Pigneur, Y. (2010). *Generación de modelos de negocio* . España: Deusto.

Revistas

Martínez, Y. A., Burques, V., & Calmus, J. (2012). Propuestas integrales para la gestión del agua. *Revista Latinoamericana de Ciencias* , 4 (2), 45-58.

Muñoz-Rodríguez, M., Santoyo-Cortés, V. H., & Aguilar-Ávila, J. (2023). Estrategias de vinculación comercial para MIPYMES rurales. *Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo* , 14 (27).
<https://doi.org/10.23913/ride.v14i27.1500>

Zhang, D. Z., & Peng, Z. R. (2014). Near-road fine particulate matter concentration estimation using artificial neural network approach. *International Journal of Environmental Science and Technology* , 11 (8), 2403–2412. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0565-4>

Referencias electrónicas

Agua.org.mx. (2025). "Calidad del agua en México", Sitio Web, En línea, disponible en: <https://agua.org.mx/calidad> Fecha de acceso: 15 de marzo de 2026. CONAGUA. (2024).

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
División de Ciencias Económico-Administrativas
Universidad Autónoma Chapingo
15 y 16 de Octubre 2025

"Plan Nacional Hídrico 2024-2030", Gobierno de México, En línea, disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/pnh-2024> Fecha de acceso: 10 de enero de 2026.INEGI. (2025).

"Censo Económico 2024: Resultados para Microempresas", Instituto Nacional de Estadística y Geografía, En línea, disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2024/> Fecha de acceso: 20 de febrero de 2026.SAT. (2026).

"Régimen Simplificado de Confianza para Personas Físicas", Servicio de Administración Tributaria, En línea, disponible en: <https://www.sat.gob.mx/resico> Fecha de acceso: 05 de abril de 2026.

STEM rural Oaxaca: implementación de un modelo educativo STEM para el desarrollo territorial y la innovación social en comunidades rurales.

Lucero Jazmin Garcia Cruz¹, Misael Navarro Aparicio¹, Daniel Alejandro Olivera Resendiz¹, Ibeth Cortes Angeles¹.

Resumen.

En comunidades rurales de Oaxaca persisten brechas educativas, tecnológicas y de acceso al conocimiento que limitan las oportunidades de aprendizaje, innovación y desarrollo territorial. La escasa disponibilidad de actividades científicas y tecnológicas, las limitadas oportunidades de alfabetización digital y la baja participación de mujeres en áreas STEM constituyen desafíos que afectan la formación de capacidades locales. Ante esta problemática, el proyecto STEM Rural Oaxaca tiene como objetivo implementar un modelo educativo STEM orientado al desarrollo territorial y la innovación social, mediante el fortalecimiento de competencias científicas, digitales, ambientales, agrícolas y sociales en comunidades rurales. La metodología contempla cinco etapas: diagnóstico comunitario para identificar necesidades educativas y tecnológicas; planeación y diseño de talleres; implementación de actividades prácticas contextualizadas; evaluación del aprendizaje y satisfacción; y seguimiento mediante la formación de promotores comunitarios y redes de colaboración. Los resultados previos evidencian la realización de talleres de ciencia y tecnología con niñas, niños y estudiantes, conferencias de producción agrícola y prácticas de manejo agronómico con productores rurales, promoviendo la vinculación entre conocimiento científico y problemáticas comunitarias obteniendo una participación en 40 municipios del estado de Oaxaca. Se concluye que el modelo STEM Rural Oaxaca constituye una estrategia con potencial para democratizar el acceso al conocimiento científico y tecnológico, fortalecer capacidades locales, fomentar la participación femenina y contribuir al desarrollo sostenible mediante la educación, la innovación social y la colaboración comunitaria.

Palabras clave: educación, innovación social, STEM.

Abstract.

Rural communities in Oaxaca continue to face educational and technological gaps, as well as limited access to knowledge, which restrict opportunities for learning, innovation, and territorial development. The limited availability of scientific and technological activities, insufficient opportunities for digital literacy, and low participation of women in STEM fields represent challenges that affect the development of local capacities. In response to this situation, the STEM Rural Oaxaca project aims to implement a STEM educational model focused on territorial development and social innovation by strengthening scientific, digital, environmental, agricultural, and social competencies in rural communities. The methodology consists of five stages: community diagnosis to identify educational and technological needs; planning and design of workshops; implementation of contextualized practical activities; assessment of learning and participant satisfaction; and follow-up through the training of community STEM promoters and the establishment of collaborative networks. Previous results demonstrate the implementation of

science and technology workshops with children and students, agricultural production conferences, and agronomic management practices with rural producers, promoting the connection between scientific knowledge and community challenges, with participation reaching 40 municipalities in the state of Oaxaca. It is concluded that the STEM Rural Oaxaca model represents a promising strategy to democratize access to scientific and technological knowledge, strengthen local capacities, promote female participation, and contribute to sustainable development through education, social innovation, and community collaboration.

Keywords: education, social innovation, STEM.

¹ Univeridad Tecnologica de la Sierra Sur de Oaxaca, Calle magnolia S/N, barrio la Soledad, Villa Sola de Vega CP. 71410, Oaxaca.
Correo de correspondencia: garjazmin374@gmail.com

Introducción

En las comunidades rurales del estado de Oaxaca persisten brechas estructurales en el acceso a educación científica, tecnologías digitales y procesos de innovación, las cuales inciden en la capacidad de los territorios para generar alternativas de desarrollo económico y social. En particular, estas limitaciones representan un desafío para el sector agrícola, donde la incorporación de conocimientos científicos, herramientas tecnológicas y procesos de innovación resulta fundamental para fortalecer las capacidades productivas, mejorar el aprovechamiento de los recursos naturales y promover sistemas agroalimentarios más sostenibles. La limitada vinculación entre el conocimiento científico, la tecnología y las necesidades productivas locales restringe la generación de soluciones contextualizadas y reduce las oportunidades de participación de las comunidades rurales en procesos de innovación y desarrollo territorial.

En este contexto, la educación STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas) puede constituirse en un mecanismo estratégico para fortalecer el capital humano y las capacidades endógenas de los territorios rurales, al promover el pensamiento crítico, la resolución de problemas y la apropiación de tecnologías aplicables a actividades productivas y sociales. Bajo esta perspectiva, STEM Rural Oaxaca plantea un modelo educativo contextualizado que articula la formación científica y tecnológica con la agricultura sustentable, la educación ambiental y la innovación social, vinculando el aprendizaje con problemáticas reales de las comunidades y con oportunidades de desarrollo productivo. La propuesta busca generar capacidades locales que permitan a niñas, niños, jóvenes, mujeres, docentes y productores participar activamente en la construcción de soluciones innovadoras y sostenibles desde el territorio.

La hipótesis central sostiene que la implementación de un modelo educativo STEM contextualizado, orientado a la apropiación del conocimiento científico y tecnológico y vinculado con las actividades productivas y las necesidades territoriales, contribuye al fortalecimiento del capital humano rural, la generación de capacidades para la innovación y la construcción de alternativas de desarrollo territorial sostenible.

Por lo anterior, el objetivo general es implementar un modelo educativo STEM que contribuya al desarrollo territorial y la innovación social en comunidades rurales de Oaxaca mediante el fortalecimiento de competencias científicas, tecnológicas, digitales, ambientales y agrícolas. De manera específica, se busca promover la alfabetización tecnológica, fortalecer las capacidades para la resolución de problemas vinculados con el territorio, impulsar la participación de mujeres y jóvenes en áreas STEM, fomentar la apropiación de tecnologías aplicadas a la agricultura sustentable y formar promotores comunitarios capaces de contribuir a la continuidad y replicabilidad de procesos de innovación social y tecnológica en sus comunidades.

Materiales y métodos.

Diseño del estudio

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque metodológico mixto, con un diseño de investigación-acción participativa (IAP), orientado a la implementación, seguimiento y evaluación de un modelo educativo basado en el enfoque Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas (STEM) para fortalecer el desarrollo territorial y la innovación social en comunidades rurales del estado de Oaxaca, México. El proyecto **STEM Rural Oaxaca** lleva una duración de dos años de ejecución continua (2024–2026), durante los cuales se implementaron estrategias de vinculación comunitaria, educación científica y transferencia de conocimientos orientadas a diversos sectores de la población rural.

Área de estudio

Las actividades se desarrollaron en aproximadamente 40 comunidades rurales pertenecientes a los distritos de Miahuatlán de Porfirio Díaz, Sola de Vega, Ejutla de Crespo y Ocotlán de Morelos, localizados en la región sur del estado de Oaxaca, México. Estas zonas se caracterizan por presentar una alta dependencia de las actividades agropecuarias, limitada infraestructura educativa y reducidas oportunidades de acceso a programas de divulgación científica y tecnológica.

Modelo de intervención STEM Rural Oaxaca

El modelo educativo implementado se diseñó con un enfoque de aprendizaje experiencial, participación comunitaria e innovación social. Las actividades fueron planeadas y ejecutadas de manera voluntaria por estudiantes universitarios, fuera del horario académico institucional y sin financiamiento externo, privilegiando el trabajo colaborativo con instituciones educativas, autoridades comunitarias y productores agrícolas.

El modelo contempló cuatro ejes estratégicos de intervención:

Divulgación científica y tecnológica en educación básica, mediante talleres interactivos dirigidos a estudiantes de escuelas primarias públicas y alumnos del Consejo Nacional de Fomento Educativo (CONAFE), promoviendo el pensamiento científico, la resolución de problemas y el interés por las áreas STEM.

Fortalecimiento del liderazgo y participación de niñas y mujeres rurales, a través de talleres especializados enfocados en el desarrollo de habilidades científicas, liderazgo comunitario, igualdad de oportunidades e inclusión en áreas de ciencia y tecnología.



Figura 1. Taller con niñas.

Fuente. Elaboracion propia.

Transferencia de conocimientos para el sector agropecuario, mediante asesorías técnicas y prácticas demostrativas en campo dirigidas a agricultores pertenecientes a diferentes municipios participantes en el programa **Sembrando Vida**, abordando temas relacionados con agricultura sustentable, manejo de cultivos, innovación tecnológica y conservación de recursos naturales.

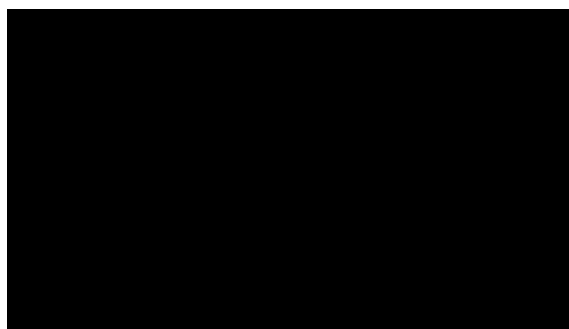


Figura 2. Asesorías técnicas.

Fuente. Elaboracion propia.

Vinculación universidad–comunidad, fortaleciendo la interacción entre estudiantes universitarios, instituciones educativas, productores agrícolas y comunidades rurales mediante actividades permanentes de acompañamiento técnico y educativo.

Actividades desarrolladas

Durante los dos años de implementación del proyecto se realizaron las siguientes acciones:

Atención directa en aproximadamente 40 comunidades rurales.

Impartición de talleres de ciencia y tecnología dirigidos a estudiantes de escuelas primarias públicas y alumnos de CONAFE.

Más de 50 asesorías técnicas personalizadas para productores agrícolas.

Más de 50 prácticas demostrativas de campo con agricultores participantes del programa Sembrando Vida.

Desarrollo de aproximadamente 20 talleres orientados al fortalecimiento de capacidades científicas y liderazgo en niñas.

Realización de alrededor de 50 talleres dirigidos a mujeres rurales sobre innovación, ciencia aplicada y desarrollo comunitario.

Todas las actividades fueron documentadas mediante registros de asistencia, evidencias fotográficas, bitácoras de campo, informes técnicos y reportes de seguimiento elaborados durante cada intervención comunitaria.



Figura 3 Taller con niñas

Fuente. Elaboracion propia

Recolección de información

La información fue obtenida mediante observación participante, registros de campo, entrevistas informales con productores y docentes, listas de asistencia, reportes de actividades y sistematización de evidencias generadas durante la implementación del proyecto. Asimismo, se recopilaron indicadores relacionados con el número de comunidades atendidas, población beneficiada, talleres impartidos, asesorías técnicas realizadas y prácticas demostrativas desarrolladas.

Análisis de la información

Los datos obtenidos fueron organizados mediante estadística descriptiva, empleando frecuencias absolutas, porcentajes y tablas de distribución para caracterizar el alcance territorial del proyecto y las acciones implementadas. Adicionalmente, se realizó un análisis cualitativo de las experiencias de vinculación comunitaria, identificando los principales aportes del modelo STEM en el fortalecimiento de capacidades locales, la apropiación del conocimiento científico y la promoción de procesos de innovación social en comunidades rurales.

Resultados y discusión.

Durante dos años de implementación del proyecto STEM Rural Oaxaca se desarrollaron actividades de educación científica y transferencia tecnológica en 40 comunidades rurales distribuidas en cuatro distritos del estado de Oaxaca. En este periodo se realizaron 50 asesorías técnicas a productores, 50 prácticas de campo, 50 talleres dirigidos a niñas y 50 talleres para

mujeres, lo que evidencia una estrategia continua de intervención comunitaria como se muestra en el cuadro 1.

Los registros muestran que la intervención alcanzó localidades pertenecientes principalmente al distrito de Miahuatlán de Porfirio Díaz, además de comunidades de los distritos de Sola de Vega, Ejutla de Crespo y Ocotlán de Morelos, fortaleciendo la cobertura territorial del proyecto.

Cuadro 1. Talleres impartidos.

Indicador	Valor
Comunidades atendidas	44
Participantes totales	1,731
Niñas participantes	640
Niños participantes	605
Productores atendidos	486
Promedio de conocimiento antes	3.33
Promedio de conocimiento después	8.00
Incremento promedio	4.68 puntos

Fuente. Elaboración propia

La cobertura institucional comprendió escuelas públicas, centros CONAFE, grupos organizados de productores agrícolas y grupos de mujeres rurales. El distrito de Miahuatlán presentó la mayor cobertura, con 16 comunidades atendidas, 20 escuelas públicas, 3 escuelas CONAFE, 8 grupos de productores, 25 productores atendidos individualmente y 15 grupos de mujeres. Los demás distritos registraron ocho comunidades atendidas cada uno, lo que evidencia una distribución relativamente equilibrada de las actividades de divulgación científica y extensión rural.

Los talleres implementados abordaron diversas temáticas orientadas al fortalecimiento de vocaciones científicas, entre ellas Pequeñas Científicas en Acción, Descubriendo el Mundo con Ciencia, Laboratorio de Científicas Rurales, Detectives de la Naturaleza, Guardianas del Agua y Química con Colores. Estas actividades permitieron la participación de niñas de educación básica mediante metodologías prácticas y aprendizaje basado en problemas.

En el componente agropecuario se realizaron prácticas demostrativas relacionadas con manejo sustentable del suelo, agricultura regenerativa, bioinsumos, nutrición vegetal, manejo integrado de cultivos, biofertilizantes y microorganismos de montaña, fortaleciendo las capacidades técnicas de productores rurales mediante procesos de aprendizaje participativo.

Evaluación del conocimiento

En las comunidades evaluadas, las calificaciones promedio de conocimiento previo oscilaron entre 2 y 5 puntos en una escala de 0 a 10, mientras que las evaluaciones posteriores alcanzaron consistentemente 8 puntos.

Estos resultados representan incrementos absolutos entre 3 y 6 puntos, equivalentes a mejoras relativas cercanas al **60%**, dependiendo del nivel inicial de conocimiento de cada comunidad. Aunque la base de datos no contiene registros individuales que permitan aplicar pruebas estadísticas inferenciales, la consistencia de los incrementos observados evidencia un efecto positivo del proceso formativo sobre la apropiación de conocimientos científicos y tecnológicos.

Asimismo, las comunidades con menores niveles iniciales de conocimiento fueron las que presentaron las mayores ganancias educativas, lo que sugiere que las estrategias pedagógicas implementadas contribuyeron a reducir brechas de acceso al conocimiento científico en contextos rurales.

Los resultados obtenidos evidencian que la implementación del programa STEM Rural Oaxaca constituye una estrategia efectiva para promover la apropiación social del conocimiento científico en comunidades rurales con limitado acceso a oportunidades educativas. La amplia cobertura territorial alcanzada demuestra que la educación STEM puede implementarse exitosamente fuera de contextos urbanos cuando las actividades responden a las necesidades locales y consideran las características socioculturales de cada comunidad.

Diversos estudios coinciden en que los programas STEM desarrollados mediante metodologías activas favorecen significativamente el desarrollo de competencias científicas, el pensamiento crítico y la resolución de problemas. Según el informe de la UNESCO (2023), la educación STEM representa una herramienta estratégica para disminuir las desigualdades educativas y fortalecer las capacidades locales necesarias para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

De manera similar, la OECD (2023) señala que las habilidades científicas, tecnológicas y digitales constituyen factores determinantes para impulsar la innovación regional y el desarrollo económico, especialmente en territorios rurales donde tradicionalmente existen limitaciones en infraestructura educativa.

El incremento observado en las evaluaciones antes y después de los talleres coincide con lo reportado por Bybee (2021), quien indica que las metodologías basadas en experiencias prácticas generan aprendizajes significativamente más duraderos que la enseñanza tradicional, debido a que los estudiantes construyen conocimiento mediante la experimentación y la resolución de problemas reales.

Así mismo, National Academies of Sciences, Engineering and Medicine (2022) destacan que las experiencias STEM contextualizadas incrementan la motivación hacia carreras científicas, particularmente entre niñas y grupos históricamente subrepresentados, aspecto que adquiere especial relevancia considerando que el proyecto desarrolló talleres específicos dirigidos al fortalecimiento de vocaciones científicas femeninas.

Desde la perspectiva del desarrollo territorial, la intervención trascendió el ámbito escolar al incorporar productores agrícolas y grupos de mujeres rurales. Este enfoque coincide con lo planteado por FAO (2022), donde se establece que los procesos de innovación rural son más exitosos cuando integran simultáneamente educación, capacitación técnica y participación comunitaria.

Las prácticas de campo relacionadas con agricultura regenerativa, bioinsumos, conservación de suelos y nutrición vegetal fortalecieron las capacidades técnicas de los productores, favoreciendo procesos de innovación agrícola local. En este sentido, Pretty et al. (2021) sostienen que la agricultura sostenible requiere procesos continuos de aprendizaje colectivo más que únicamente la transferencia de tecnologías.

Por otra parte, la cobertura alcanzada en cuatro distritos refleja un importante potencial para la escalabilidad del modelo. Estudios recientes sobre innovación social señalan que las intervenciones comunitarias adquieren mayor impacto cuando se consolidan redes territoriales entre instituciones educativas, comunidades rurales y organizaciones locales (European Commission, 2023).

No obstante, el presente estudio presenta algunas limitaciones metodológicas. La información disponible corresponde a registros consolidados por comunidad y no incluye mediciones individuales de cada participante. Esta situación impide aplicar pruebas estadísticas inferenciales como pruebas t, ANOVA o modelos lineales, limitando el análisis a estadística descriptiva. Futuras investigaciones deberían incorporar bases de datos individuales con mediciones pre y post intervención para estimar tamaños del efecto e intervalos de confianza que permitan cuantificar con mayor precisión el impacto educativo del programa.

A pesar de esta limitación, la consistencia de los incrementos observados en todas las comunidades sugiere que el modelo de intervención posee un elevado potencial para fortalecer la alfabetización científica y tecnológica en territorios rurales de Oaxaca, contribuyendo simultáneamente al desarrollo territorial, la innovación social y la inclusión educativa.

Conclusiones.

El modelo STEM Rural Oaxaca demostró ser una estrategia efectiva para fortalecer el talento científico, la innovación y el pensamiento crítico en comunidades rurales, promoviendo la participación de jóvenes en áreas de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas. Esta iniciativa contribuye al desarrollo territorial mediante la generación de capacidades científicas orientadas a resolver problemáticas del entorno agrícola y social, impulsando una educación más inclusiva, sostenible y transformadora.

Literatura citada.

- Bybee, R. W. (2021). *STEM Education Now More Than Ever*. NSTA Press.
European Commission. (2023). *Social Innovation: Inspire, Connect, Enable*.
Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *The State of Food and Agriculture 2022*.

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
División de Ciencias Económico-Administrativas
Universidad Autónoma Chapingo
15 y 16 de Octubre 2025

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2022). *STEM Education for the Future*.

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2023). *Education at a Glance 2023*.
UNESCO. (2023). *Global Education Monitoring Report 2023*.

Innovación socio-técnica, gobernanza territorial y resiliencia agroalimentaria en Atlautla, Estado de México

Villaseñor Garrido Israel¹, Salas Gonzales José María¹, Sagarnaga Villegas Leticia Myriam¹, Daniel Vega Martínez²

¹ Estudiante de Posgrado de la Universidad Autónoma Chapingo

² Profesor Investigador adscrito al departamento de Sociología Rural de la Universidad Autónoma Chapingo

³ Profesor Investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco

Resumen

Los sistemas agroalimentarios rurales enfrentan una crisis estructural marcada por degradación ambiental, vulnerabilidad climática, inseguridad alimentaria y debilidad institucional. En México, estas problemáticas se intensifican en territorios como Atlautla, Estado de México, donde la fragmentación productiva y la presión sobre recursos naturales limitan la sostenibilidad y resiliencia agropecuaria.

El objetivo de esta investigación es desarrollar un modelo de innovación socio-técnica basado en gobernanza territorial, resiliencia socioecológica y participación colaborativa, orientado a fortalecer la transición agroalimentaria sostenible en Atlautla. Para ello se plantea un enfoque interdisciplinario que integra agroecología, análisis de redes sociales, procesos de backcasting y metodologías participativas de diagnóstico territorial.

La metodología considera: i) caracterización socioambiental y productiva del municipio; ii) identificación de brechas de innovación técnica e institucional; iii) análisis de redes de interacción entre actores comunitarios, académicos y gubernamentales; y iv) evaluación de resiliencia socioecológica de los sistemas agropecuarios locales.

Se espera que los resultados evidencien cómo la articulación de actores y la co-innovación territorial pueden fortalecer capacidades adaptativas, mejorar la sostenibilidad productiva y contribuir a la soberanía alimentaria. Asimismo, se busca demostrar que la innovación socio-técnica no se limita a procesos tecnológicos, sino que implica transformaciones estructurales en relaciones sociales, institucionales y territoriales.

En conclusión, la investigación propone que la integración de gobernanza colaborativa, resiliencia socioecológica y agroecología constituye una vía estratégica para enfrentar la crisis agroalimentaria y construir territorios rurales sostenibles en México.

Abstract

Rural agrifood systems face a structural crisis characterized by environmental degradation, climate vulnerability, food insecurity, and institutional weakness. In Mexico, these challenges are particularly evident in territories such as Atlautla, State of Mexico, where productive fragmentation and pressure on natural resources limit sustainability and resilience.

The objective of this research is to develop a socio-technical innovation model based on territorial governance, socio-ecological resilience, and collaborative participation, aimed at strengthening the

sustainable agrifood transition in Atlautla. An interdisciplinary approach is proposed, integrating agroecology, social network analysis, backcasting processes, and participatory territorial diagnostics.

The methodology includes: i) characterization of socio-environmental and productive conditions; ii) identification of technical and institutional innovation gaps; iii) analysis of governance dynamics and actor networks; and iv) evaluation of socio-ecological resilience of local agrifood systems.

Expected results highlight how actor articulation and territorial co-innovation can strengthen adaptive capacities, improve productive sustainability, and contribute to food sovereignty. Furthermore, the study demonstrates that socio-technical innovation is not limited to technological processes but involves structural transformations in social, institutional, and territorial relations.

In conclusion, the research argues that integrating collaborative governance, socio-ecological resilience, and agroecology represents a strategic pathway to address the agrifood crisis and build sustainable rural territories in Mexico.

Introducción

Los sistemas agroalimentarios contemporáneos enfrentan una crisis multidimensional caracterizada por degradación ambiental, inseguridad alimentaria, vulnerabilidad climática y debilitamiento de las capacidades comunitarias de gobernanza. La Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO 2021), señala que la transformación sostenible de los sistemas agroalimentarios constituye uno de los principales desafíos globales para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente en territorios rurales afectados por pobreza, degradación de recursos naturales y fragilidad institucional.

En América Latina, las dinámicas asociadas al cambio climático, la degradación de suelos y la desigualdad socioeconómica han incrementado la vulnerabilidad de pequeños productores rurales y sistemas familiares de producción (United Nations Development Programme [UNDP], 2022). En este contexto, la agroecología y las transiciones socio-técnicas han emergido como enfoques estratégicos para fortalecer la resiliencia territorial y la sostenibilidad agroalimentaria (Altieri, 1995; Gliessman, 2015).

Desde la perspectiva multinivel (Multi-Level Perspective, MLP), las transiciones sostenibles dependen de la interacción entre innovaciones emergentes, actores institucionales, dinámicas de mercado y transformaciones socioculturales (Geels, 2004). Bajo esta aproximación, los territorios rurales representan espacios complejos donde convergen tensiones entre modelos convencionales de producción y nuevas formas de organización socioecológica orientadas a la sostenibilidad.

De manera complementaria, Ostrom (1990) argumenta que la sostenibilidad territorial requiere mecanismos de gobernanza colectiva capaces de fortalecer la cooperación y la gestión comunitaria de los recursos naturales. Asimismo, Folke et al. (2005) destacan que la resiliencia socioecológica depende de la capacidad adaptativa de los sistemas sociales para responder a perturbaciones ambientales, económicas y políticas.

MARCO TEÓRICO

La transformación de los sistemas agroalimentarios constituye uno de los desafíos estructurales más relevantes del siglo XXI debido a la creciente convergencia de crisis ambientales, climáticas, económicas y sociales que afectan la sostenibilidad de los territorios rurales a escala global. Diversos organismos internacionales, entre ellos la Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), el United Nations

Development Programme (UNDP) y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), han advertido que los actuales modelos de producción agroalimentaria presentan elevados niveles de vulnerabilidad frente a fenómenos asociados con degradación de suelos, pérdida de biodiversidad, dependencia tecnológica, inseguridad alimentaria, fragmentación territorial y desigualdad socioeconómica (FAO, 2021; IPCC, 2022; UNDP, 2022).

En América Latina, estas problemáticas adquieren especial relevancia debido a la persistencia de desigualdades estructurales históricas relacionadas con concentración de recursos productivos, marginación rural, debilidad institucional y deterioro socioambiental. La CEPAL y la FAO (2020) sostienen que los territorios rurales latinoamericanos enfrentan procesos acumulativos de vulnerabilidad derivados de la presión sobre recursos naturales, expansión de modelos agroindustriales intensivos y limitada capacidad de adaptación frente al cambio climático. Bajo este contexto, los sistemas agroalimentarios requieren enfoques integrales capaces de articular sostenibilidad ecológica, resiliencia territorial, gobernanza participativa e innovación social.

Frente a estas problemáticas, las aproximaciones tradicionales de modernización agrícola han mostrado limitaciones significativas debido a su énfasis en productividad, intensificación tecnológica y transferencia lineal de innovación. Diversos autores coinciden en que dichos enfoques tienden a fragmentar las dimensiones sociales, ambientales y políticas que intervienen en la sostenibilidad rural (Altieri, 1995; Gliessman, 2015; Scoones et al., 2015). En consecuencia, durante las últimas décadas han emergido perspectivas interdisciplinarias orientadas a comprender los territorios rurales como sistemas socioecológicos complejos donde interactúan dinámicas ecológicas, institucionales, económicas, culturales y tecnológicas.

Uno de los enfoques más influyentes en el estudio de transformaciones sostenibles es la teoría de transiciones socio-técnicas desarrollada por Geels (2002, 2004). Desde la perspectiva multinivel (Multi-Level Perspective, MLP), este autor plantea que las transiciones sostenibles ocurren mediante interacciones dinámicas entre tres niveles analíticos: nichos de innovación, regímenes sociotécnicos y paisaje sociotécnico. Los nichos representan espacios protegidos donde emergen innovaciones alternativas; los regímenes corresponden a estructuras dominantes compuestas por instituciones, tecnologías, políticas y prácticas estabilizadas; mientras que el paisaje engloba procesos macroestructurales relacionados con dinámicas económicas, culturales, ambientales y políticas de largo plazo (Geels, 2002).

La relevancia del enfoque multinivel radica en que permite comprender las transformaciones rurales más allá de cambios tecnológicos aislados. Para Geels (2004), las transiciones sostenibles implican procesos complejos de reconfiguración institucional y sociopolítica donde intervienen múltiples actores, intereses y escalas territoriales. Bajo esta perspectiva, la innovación deja de concebirse como un fenómeno exclusivamente técnico para entenderse como un proceso relacional y sistémico condicionado por estructuras de gobernanza, dinámicas culturales y capacidades territoriales.

No obstante, diversos autores han señalado limitaciones importantes dentro de las teorías de transición socio-técnica. Smith et al. (2005) argumentan que algunos enfoques multinivel

presentan tendencias excesivamente estructuralistas y tecnocéntricas, minimizando conflictos sociales y relaciones de poder presentes en los procesos de transformación. En una línea similar, Scoones et al. (2015) sostienen que las transiciones hacia la sostenibilidad no pueden analizarse únicamente desde innovación tecnológica, sino considerando disputas políticas relacionadas con acceso a recursos, soberanía alimentaria, justicia ambiental y control territorial.

Estas críticas resultan particularmente relevantes en contextos rurales latinoamericanos caracterizados por desigualdad social, fragmentación institucional y dependencia económica. Desde esta perspectiva, las transiciones agroalimentarias no representan procesos lineales ni neutrales, sino escenarios de disputa entre modelos productivos convencionales y propuestas alternativas orientadas a la sustentabilidad y resiliencia territorial. En consecuencia, el análisis de la transición agropecuaria requiere incorporar dimensiones políticas, culturales y comunitarias frecuentemente ausentes en enfoques tradicionales de innovación.

En este marco, la agroecología ha emergido como una de las perspectivas más relevantes para repensar los sistemas agroalimentarios contemporáneos. Altieri (1995) define la agroecología como una disciplina científica orientada a aplicar principios ecológicos al diseño y manejo de agroecosistemas sostenibles. Para este autor, la agricultura industrializada ha provocado pérdida de biodiversidad, dependencia de insumos externos, degradación ambiental y vulnerabilidad socioeconómica de pequeños productores rurales. En contraste, la agroecología promueve diversidad biológica, autonomía campesina, conservación ecológica y fortalecimiento de sistemas alimentarios locales.

La propuesta agroecológica de Altieri presenta además una dimensión política significativa vinculada a soberanía alimentaria y resistencia frente a procesos de homogenización agroindustrial. Desde esta perspectiva, la sustentabilidad rural no depende exclusivamente de eficiencia técnica, sino de la capacidad de las comunidades para mantener control territorial sobre producción, semillas, recursos naturales y mecanismos de comercialización. Este enfoque dialoga estrechamente con los planteamientos de movimientos campesinos latinoamericanos que cuestionan las implicaciones sociales y ambientales de los modelos agroexportadores dominantes.

Por su parte, Gliessman (2015) amplía el análisis agroecológico proponiendo que las transiciones sostenibles requieren transformar integralmente los sistemas alimentarios, incluyendo producción, distribución, consumo y gobernanza. A diferencia de enfoques centrados únicamente en prácticas agrícolas, Gliessman plantea una transición sistémica donde la sustentabilidad depende de la reorganización de relaciones económicas, institucionales y territoriales. Aunque comparte con Altieri la crítica al modelo agroindustrial, Gliessman desarrolla una aproximación más orientada a rediseño integral de cadenas agroalimentarias y construcción de sistemas alimentarios resilientes.

Las diferencias entre Altieri y Gliessman resultan analíticamente relevantes para investigaciones territoriales. Mientras Altieri (1995) enfatiza dimensiones políticas y campesinas de la agroecología, Gliessman (2015) incorpora una visión sistémica enfocada en transformación integral de sistemas alimentarios. Esta complementariedad permite analizar simultáneamente

dimensiones ecológicas, productivas, sociales e institucionales dentro de procesos de transición agropecuaria.

La discusión sobre sostenibilidad rural también ha incorporado de manera creciente los enfoques de resiliencia socioecológica. Folke et al. (2005) sostienen que los sistemas territoriales resilientes poseen capacidad adaptativa para responder, reorganizarse y transformarse frente a perturbaciones ambientales, económicas y sociales. Desde esta perspectiva, la resiliencia no implica únicamente estabilidad o resistencia al cambio, sino capacidad transformativa para generar nuevas configuraciones socioecológicas sostenibles.

El concepto de resiliencia socioecológica ha sido ampliamente utilizado para analizar territorios rurales afectados por cambio climático, degradación ambiental e inseguridad alimentaria. Walker et al. (2004) argumentan que los sistemas socioecológicos atraviesan procesos continuos de adaptación y reorganización, por lo que la sostenibilidad depende de capacidades colectivas de aprendizaje, innovación y gobernanza adaptativa. En consecuencia, la resiliencia territorial requiere fortalecer redes sociales, capacidades institucionales y mecanismos de cooperación comunitaria.

En diálogo con estas aproximaciones, la gobernanza territorial emerge como un componente central para comprender las dinámicas de transición rural. Los aportes de Ostrom (1990) resultan fundamentales en este ámbito debido a que cuestionan tanto los enfoques centralizados de gestión estatal como las perspectivas puramente mercantiles sobre recursos naturales. Ostrom demuestra que las comunidades pueden construir arreglos institucionales efectivos para gestionar bienes comunes mediante reglas compartidas, cooperación y acción colectiva.

La relevancia de Ostrom para los estudios rurales contemporáneos radica en que permite comprender cómo determinados territorios desarrollan capacidades organizativas orientadas a sostenibilidad y manejo comunitario de recursos. Sin embargo, diversos autores señalan que las condiciones actuales de globalización económica y presión agroindustrial generan escenarios mucho más complejos que aquellos analizados originalmente por Ostrom (Scoones et al., 2015). En consecuencia, la gobernanza territorial contemporánea requiere incorporar análisis multinivel donde interactúan actores locales, instituciones gubernamentales, mercados globales y organismos internacionales.

Bajo esta lógica, Rotmans et al. (2001) y Loorbach (2010) desarrollan el concepto de gobernanza de transición para explicar cómo las transformaciones sostenibles requieren procesos deliberativos de largo plazo capaces de articular actores públicos, privados, académicos y comunitarios. Desde esta perspectiva, la innovación territorial depende de mecanismos colaborativos orientados a aprendizaje colectivo, co-innovación y adaptación institucional.

Las propuestas de gobernanza de transición adquieren especial relevancia en sistemas agroalimentarios debido a la complejidad de actores involucrados en producción, comercialización, regulación y gestión ambiental. La FAO (2021) sostiene que la resiliencia agroalimentaria requiere fortalecer gobernanza multinivel, innovación participativa y construcción territorial de capacidades adaptativas. En consecuencia, los procesos de transformación rural no

pueden limitarse a incorporación tecnológica, sino que deben integrar participación social, articulación institucional y construcción colectiva de agendas territoriales.

En años recientes, la literatura sobre innovación socio-técnica ha incorporado metodologías participativas y enfoques de co-innovación orientados a fortalecer resiliencia territorial. Elsner et al. (2023) identifican un crecimiento significativo de investigaciones que aplican el enfoque multinivel a sistemas agroalimentarios incorporando dimensiones sociales, ambientales e institucionales. Los autores destacan que las transiciones agroalimentarias requieren análisis interdisciplinarios capaces de integrar gobernanza, innovación y sostenibilidad territorial.

Asimismo, Remans et al. (2024) sostienen que herramientas participativas como el backcasting permiten construir visiones compartidas de futuro y facilitar procesos de innovación colaborativa. Desde esta perspectiva, la transición agroalimentaria depende de la capacidad de los territorios para construir agendas estratégicas basadas en aprendizaje social y articulación multisectorial.

Complementariamente, Widayat et al. (2023) demuestran que el análisis de redes sociales constituye una herramienta estratégica para identificar actores clave, flujos de conocimiento y dinámicas de gobernanza dentro de sistemas agroalimentarios. Estas metodologías permiten comprender cómo circula el capital social dentro de los territorios y cómo determinadas configuraciones institucionales favorecen o limitan procesos de innovación sostenible.

En México, las investigaciones sobre desarrollo rural han evidenciado persistencia de problemáticas estructurales relacionadas con marginación territorial, degradación ambiental, baja rentabilidad agropecuaria y limitada articulación institucional. Particularmente en territorios rurales del centro del país, la presión sobre recursos naturales, la fragmentación productiva y la vulnerabilidad climática incrementan los desafíos para construir modelos agroalimentarios sostenibles y resilientes.

En este contexto, el municipio de Atlautla, Estado de México, representa un territorio estratégico para analizar procesos de transición agropecuaria resiliente debido a la convergencia de vulnerabilidad socioambiental, degradación productiva y necesidad de fortalecimiento institucional. La construcción de estrategias territoriales sostenibles requiere integrar innovación socio-técnica, agroecología, resiliencia socioecológica y gobernanza participativa mediante enfoques interdisciplinarios capaces de articular conocimiento científico, saberes locales y participación comunitaria.

Bajo este marco conceptual, el presente estudio asume que la transición agropecuaria resiliente depende de la capacidad de los territorios rurales para construir mecanismos de gobernanza colaborativa, fortalecer redes de innovación territorial y desarrollar procesos de co-innovación orientados a sostenibilidad, justicia social y soberanía alimentaria. Desde esta perspectiva, la innovación socio-técnica constituye no solamente un proceso tecnológico, sino una transformación estructural de relaciones sociales, institucionales y territoriales que configuran los sistemas agroalimentarios contemporáneos.

METODOLOGÍA

Enfoque epistemológico y paradigma de investigación

La presente investigación se desarrolla desde un enfoque interdisciplinario sustentado en el paradigma de la complejidad y la perspectiva socioecológica de los sistemas territoriales. Este posicionamiento epistemológico reconoce que los sistemas agroalimentarios constituyen configuraciones dinámicas donde interactúan dimensiones ecológicas, económicas, culturales, tecnológicas, institucionales y políticas, por lo que su análisis requiere aproximaciones integrales capaces de comprender relaciones multiescalares y procesos de transformación territorial (Morin, 2008; Folke et al., 2005).

Desde esta perspectiva, la investigación asume que la realidad rural no puede analizarse mediante enfoques reduccionistas o exclusivamente sectoriales, debido a que las problemáticas agropecuarias contemporáneas emergen de interacciones complejas entre actores sociales, estructuras institucionales, dinámicas ambientales y procesos históricos de desarrollo territorial. En consecuencia, el estudio se sustenta en una lógica epistemológica constructivista-crítica orientada a comprender los procesos de innovación socio-técnica como fenómenos relacionales y territorialmente situados (Scoones et al., 2015).

Asimismo, la investigación incorpora elementos de la teoría de transiciones socio-técnicas propuesta por Geels (2002, 2004), la cual plantea que los procesos de transformación sostenible dependen de interacciones entre innovación, gobernanza, estructuras institucionales y dinámicas territoriales. Bajo esta aproximación, la transición agropecuaria resiliente se concibe como un proceso multidimensional donde convergen capacidades adaptativas, participación comunitaria y construcción colectiva de estrategias territoriales.

Enfoque metodológico

La investigación adopta un enfoque mixto secuencial con integración de métodos cuantitativos y cualitativos. De acuerdo con Creswell y Plano Clark (2018), los métodos mixtos permiten comprender fenómenos complejos mediante la articulación de información estadística, análisis territorial y aproximaciones interpretativas orientadas a comprender significados, relaciones sociales y dinámicas institucionales.

La elección de un diseño mixto responde a la necesidad de analizar simultáneamente las condiciones socioambientales, las dinámicas productivas, las estructuras de gobernanza, las relaciones entre actores, las capacidades territoriales y los procesos de innovación y resiliencia presentes en el territorio de estudio. En este sentido, la integración metodológica busca superar enfoques fragmentados de investigación rural mediante la triangulación de múltiples fuentes de información y niveles de análisis.

Tipo y alcance de la investigación

El estudio posee un alcance descriptivo, analítico, explicativo y propositivo. Es descriptivo debido a que caracteriza las condiciones socioambientales, productivas e institucionales del territorio de estudio. Posee un componente analítico al examinar las relaciones entre actores, gobernanza territorial y dinámicas de innovación presentes en los sistemas agropecuarios locales. Asimismo,

presenta un alcance explicativo orientado a comprender los factores que influyen en la resiliencia agropecuaria y la transición territorial sostenible.

Finalmente, la investigación incorpora una dimensión propositiva mediante el diseño de un modelo interdisciplinario de innovación socio-técnica orientado al fortalecimiento de la resiliencia agroalimentaria en Atlautla, Estado de México.

Área de estudio

La investigación se desarrollará en el municipio de Atlautla, Estado de México, territorio localizado en la región oriente de la entidad y caracterizado por una importante presencia de actividades agropecuarias de pequeña escala. El municipio presenta condiciones agroecológicas vinculadas con agricultura de temporal, sistemas pecuarios familiares y aprovechamiento de recursos naturales asociados al entorno montañoso cercano al volcán Popocatepetl.

El territorio enfrenta problemáticas relacionadas con degradación de suelos, presión sobre recursos naturales, vulnerabilidad climática, fragmentación productiva y limitadas capacidades de articulación institucional, condiciones que afectan la sostenibilidad de los sistemas agropecuarios locales y reducen las capacidades adaptativas de los productores rurales frente a escenarios de incertidumbre ambiental y económica.

Estas características convierten a Atlautla en un espacio estratégico para analizar procesos de innovación territorial, gobernanza colaborativa y transición agroalimentaria resiliente en contextos rurales vulnerables.

Unidad de análisis

La unidad de análisis estará conformada por productores agropecuarios, actores comunitarios, representantes institucionales, organizaciones locales, actores académicos y participantes vinculados con procesos de gobernanza territorial y desarrollo rural. El estudio considera tanto dimensiones biofísicas del territorio como relaciones sociales, institucionales y productivas que intervienen en la construcción de resiliencia agroalimentaria y sostenibilidad territorial.

Técnicas e instrumentos de recolección de información

Diagnóstico socioambiental y productivo

Se aplicarán encuestas estructuradas a productores agropecuarios locales con el objetivo de recopilar información relacionada con prácticas productivas, uso de agroquímicos, manejo de recursos naturales, percepción de vulnerabilidad climática, acceso a innovación, redes de colaboración y estrategias adaptativas implementadas por los actores rurales.

El diseño de los instrumentos considerará variables socioeconómicas, productivas y territoriales relacionadas con resiliencia agroalimentaria, sostenibilidad ambiental y gobernanza local. Asimismo, se incorporarán indicadores vinculados con diversificación productiva, capacidad adaptativa y acceso a procesos de innovación territorial.

Entrevistas semiestructuradas

Se desarrollarán entrevistas dirigidas a productores rurales, autoridades locales, representantes institucionales, actores académicos y organizaciones comunitarias con la finalidad de profundizar en dinámicas de gobernanza, problemáticas territoriales, barreras de innovación, procesos de articulación institucional y estrategias de adaptación implementadas en el territorio.

De acuerdo con Patton (2015), las entrevistas cualitativas permiten comprender percepciones, experiencias y significados construidos por los actores involucrados en procesos complejos de transformación territorial. En consecuencia, esta técnica facilitará el análisis de relaciones sociales, conflictos territoriales y mecanismos de colaboración presentes en los sistemas agroalimentarios locales.

Talleres participativos y backcasting

La investigación incorporará talleres participativos orientados a la construcción colectiva de diagnósticos territoriales, identificación de problemáticas prioritarias, análisis de necesidades locales y diseño de escenarios prospectivos vinculados con transición agropecuaria sostenible.

Asimismo, se utilizará la metodología de backcasting propuesta por Robinson (1990) y retomada por Remans et al. (2024), la cual permite construir visiones futuras deseables y definir estrategias necesarias para alcanzarlas mediante procesos colaborativos de planificación territorial. Esta aproximación facilitará la formulación participativa de propuestas orientadas a resiliencia agroalimentaria y gobernanza sostenible.

Análisis de redes sociales (ARS)

Con el objetivo de comprender las dinámicas de gobernanza territorial e interacción institucional, se aplicará análisis de redes sociales (ARS). Esta metodología permitirá identificar actores clave, niveles de articulación, flujos de información, relaciones de colaboración, estructuras de gobernanza y centralidad de actores territoriales involucrados en procesos de innovación agropecuaria.

El procesamiento y visualización de redes se realizará mediante el software Gephi, ampliamente utilizado en investigaciones sobre gobernanza, innovación territorial y análisis relacional (Widayat et al., 2023). El ARS permitirá analizar cómo las configuraciones sociales e institucionales influyen en la construcción de resiliencia territorial y capacidades colectivas de innovación.

Estrategia de análisis de información

La información cuantitativa obtenida mediante encuestas y análisis territoriales será procesada mediante estadística descriptiva y análisis multivariable utilizando software especializado. Se buscará identificar patrones asociados con vulnerabilidad socioambiental, resiliencia productiva, capacidades adaptativas y niveles de articulación territorial.

Por su parte, la información cualitativa derivada de entrevistas y talleres participativos será analizada mediante codificación temática y análisis interpretativo, identificando categorías

relacionadas con gobernanza territorial, innovación socio-técnica, participación comunitaria, resiliencia socioecológica y transición agroalimentaria.

La investigación utilizará triangulación metodológica para fortalecer la validez y confiabilidad de resultados mediante integración de evidencia estadística, análisis territorial, información cualitativa y análisis relacional. De acuerdo con Denzin (2012), la triangulación permite incrementar profundidad analítica y comprensión integral de fenómenos complejos mediante convergencia de múltiples perspectivas metodológicas.

RESULTADOS ESPERADOS

La presente investigación pretende generar aportaciones científicas, metodológicas y territoriales orientadas al fortalecimiento de procesos de transición agropecuaria resiliente en contextos rurales vulnerables. En términos generales, se espera que el estudio contribuya a la construcción de un modelo interdisciplinario de innovación socio-técnica capaz de articular gobernanza territorial, resiliencia socioecológica y participación colaborativa en el municipio de Atlautla, Estado de México.

Uno de los principales resultados esperados consiste en la generación de un diagnóstico integral sobre las condiciones socioambientales, productivas e institucionales que influyen en la sostenibilidad agroalimentaria del territorio. Este diagnóstico permitirá identificar factores críticos asociados con degradación ambiental, vulnerabilidad climática, fragmentación productiva y limitadas capacidades de articulación institucional presentes en los sistemas agropecuarios locales.

Asimismo, se espera obtener una caracterización detallada de las dinámicas de gobernanza territorial y de las redes de interacción entre actores comunitarios, institucionales, académicos y productivos. A través del análisis de redes sociales (ARS), la investigación permitirá identificar actores estratégicos, niveles de centralidad, estructuras de colaboración y flujos de conocimiento vinculados con procesos de innovación territorial y transición agroalimentaria.

De igual manera, se prevé identificar las principales barreras técnicas, organizacionales e institucionales que limitan el desarrollo de estrategias de resiliencia agroecológica y sostenibilidad productiva. Entre estas barreras podrían encontrarse debilidades en mecanismos de coordinación territorial, acceso limitado a innovación tecnológica, fragmentación de capacidades organizativas y limitada integración entre actores locales y estructuras institucionales.

Desde una perspectiva socioecológica, se espera evaluar las capacidades adaptativas de los sistemas agropecuarios locales frente a escenarios de vulnerabilidad climática y degradación ambiental. Esta evaluación permitirá analizar cómo las prácticas productivas, las relaciones sociales y los mecanismos de gobernanza influyen en la resiliencia territorial y en la capacidad de respuesta de las comunidades rurales ante escenarios de incertidumbre.

Otro resultado relevante será la construcción participativa de escenarios prospectivos orientados a la transición agropecuaria sostenible mediante la aplicación de metodologías de backcasting y talleres colaborativos. Este proceso permitirá generar agendas territoriales compartidas y fortalecer

mecanismos de participación social en la construcción de estrategias de sostenibilidad agroalimentaria.

En términos metodológicos, la investigación busca consolidar una propuesta interdisciplinaria que integre herramientas de análisis territorial, análisis de redes sociales, diagnóstico participativo y gobernanza colaborativa. Esta aproximación podría constituir una contribución relevante para futuras investigaciones sobre resiliencia territorial, innovación socio-técnica y transición agroalimentaria en contextos rurales latinoamericanos.

Desde una dimensión aplicada, el estudio pretende diseñar un modelo de innovación socio-técnica orientado al fortalecimiento de capacidades territoriales para la transición agropecuaria resiliente. Dicho modelo buscará integrar principios de agroecología, gobernanza adaptativa, innovación colaborativa y sostenibilidad territorial mediante mecanismos participativos de articulación entre actores locales, instituciones públicas y sector académico.

La investigación también espera contribuir al fortalecimiento de políticas públicas orientadas a desarrollo rural sostenible, soberanía alimentaria y adaptación climática. Los resultados obtenidos podrían proporcionar evidencia científica útil para el diseño de programas de intervención territorial enfocados en resiliencia agroalimentaria, conservación de recursos naturales y fortalecimiento de capacidades comunitarias.

En el ámbito académico, el estudio pretende aportar al debate contemporáneo sobre transiciones socio-técnicas y sostenibilidad rural mediante una aproximación interdisciplinaria aplicada al contexto mexicano. Particularmente, se espera contribuir a la discusión sobre cómo los procesos de gobernanza territorial y co-innovación pueden fortalecer resiliencia socioecológica en sistemas agroalimentarios vulnerables.

Finalmente, se prevé que la investigación genere bases conceptuales y metodológicas transferibles a otros territorios rurales de México y América Latina que enfrentan problemáticas similares relacionadas con degradación ambiental, vulnerabilidad climática y necesidad de fortalecimiento institucional. Bajo esta lógica, el estudio busca trascender el análisis local para contribuir al diseño de estrategias regionales de transición agroalimentaria sostenible y resiliente.

DISCUSIÓN TEÓRICA PRELIMINAR

Las transformaciones contemporáneas de los sistemas agroalimentarios han generado un debate creciente en torno a la capacidad de los territorios rurales para construir modelos sostenibles frente a escenarios de crisis climática, degradación ambiental y vulnerabilidad socioeconómica. En este contexto, la presente investigación se inserta dentro de las discusiones sobre transición socio-técnica, resiliencia territorial y gobernanza agroalimentaria, articulando enfoques provenientes de la agroecología, la complejidad y los estudios de innovación territorial.

Uno de los principales debates presentes en la literatura científica contemporánea se relaciona con las limitaciones de los modelos tradicionales de modernización agrícola. Diversos autores sostienen que las estrategias centradas exclusivamente en productividad y transferencia tecnológica han generado procesos de dependencia económica, deterioro ambiental y

fragmentación territorial (Altieri, 1995; Gliessman, 2015). Desde esta perspectiva, la sostenibilidad agroalimentaria requiere superar enfoques reduccionistas y avanzar hacia modelos integrales capaces de incorporar dimensiones ecológicas, sociales, culturales e institucionales.

En este sentido, la teoría de transiciones socio-técnicas desarrollada por Geels (2002, 2004) aporta elementos relevantes para comprender cómo las transformaciones sostenibles emergen de interacciones complejas entre actores, instituciones, tecnologías y dinámicas territoriales. Sin embargo, diversos autores han cuestionado que algunos enfoques multinivel tienden a subestimar las relaciones de poder y desigualdad presentes en los procesos de transición (Scoones et al., 2015).

La presente investigación coincide con dichas críticas al reconocer que los territorios rurales latinoamericanos no constituyen escenarios homogéneos de innovación, sino espacios atravesados por desigualdades estructurales, limitaciones institucionales y conflictos territoriales. Bajo esta lógica, la transición agroalimentaria sostenible requiere incorporar perspectivas críticas capaces de analizar las dimensiones políticas y sociales que intervienen en la construcción de resiliencia territorial.

Asimismo, el estudio retoma los planteamientos de Ostrom (1990) y Folke et al. (2005), quienes sostienen que la sostenibilidad territorial depende de capacidades colectivas de gobernanza y adaptación socioecológica. Desde esta perspectiva, los procesos de resiliencia no deben entenderse únicamente como mecanismos de resistencia frente al cambio, sino como capacidades transformativas orientadas a reorganizar sistemas territoriales bajo principios de sostenibilidad y justicia socioambiental.

En el ámbito agroecológico, Altieri (1995) enfatiza la necesidad de fortalecer autonomía campesina, biodiversidad y soberanía alimentaria frente a los impactos del modelo agroindustrial dominante. Por su parte, Gliessman (2015) amplía esta discusión al proponer una transformación sistémica de las cadenas agroalimentarias que involucre producción, distribución, consumo y gobernanza.

La investigación busca articular estas aproximaciones mediante un enfoque interdisciplinario orientado a comprender cómo las dinámicas de gobernanza territorial y co-innovación pueden fortalecer procesos de transición agropecuaria resiliente en contextos rurales vulnerables. Bajo esta perspectiva, la innovación socio-técnica no se concibe únicamente como incorporación de tecnología, sino como construcción colectiva de capacidades territoriales orientadas a sostenibilidad agroalimentaria.

De igual manera, el estudio reconoce la importancia de metodologías participativas y análisis relacional para comprender dinámicas de articulación institucional y construcción de capital social. En este sentido, el análisis de redes sociales y los procesos de backcasting constituyen herramientas estratégicas para analizar mecanismos de colaboración territorial y construcción colectiva de escenarios sostenibles.

Finalmente, la investigación plantea que la transición agropecuaria resiliente requiere fortalecer procesos de gobernanza adaptativa capaces de integrar actores públicos, comunitarios, académicos

y productivos en estrategias colaborativas de largo plazo. Esta aproximación busca contribuir al diseño de modelos territoriales de innovación orientados a sostenibilidad, resiliencia y justicia socioambiental en territorios rurales de México y América Latina.

CONCLUSIONES

La presente investigación permitió analizar la importancia de integrar innovación socio-técnica, resiliencia socioecológica y gobernanza territorial como componentes estratégicos para fortalecer procesos de transición agropecuaria sostenible en contextos rurales vulnerables. A partir del análisis teórico y metodológico desarrollado, se concluye que los sistemas agroalimentarios contemporáneos enfrentan problemáticas complejas que no pueden abordarse mediante enfoques sectoriales o exclusivamente tecnológicos.

Uno de los principales hallazgos conceptuales del estudio radica en reconocer que la sostenibilidad agroalimentaria depende de procesos de articulación territorial capaces de integrar actores comunitarios, instituciones públicas, sector académico y productores rurales en estrategias colaborativas de largo plazo. Bajo esta lógica, la resiliencia territorial no debe entenderse únicamente como capacidad de resistencia frente a perturbaciones ambientales, sino como una capacidad transformativa orientada a reorganizar sistemas territoriales bajo principios de sostenibilidad y justicia socioambiental.

La investigación también permitió identificar que las limitaciones presentes en numerosos programas de desarrollo rural derivan de modelos verticales de intervención que privilegian transferencia tecnológica sin considerar dinámicas territoriales, participación comunitaria y construcción colectiva de capacidades locales. En consecuencia, se concluye que la innovación socio-técnica requiere incorporar dimensiones sociales, culturales, políticas e institucionales para generar procesos sostenibles de transición agroalimentaria.

Asimismo, el estudio evidencia que las dinámicas de gobernanza territorial poseen un papel central en la construcción de resiliencia agroecológica. La articulación entre actores sociales, redes de colaboración y mecanismos de participación comunitaria influye significativamente en la capacidad de los territorios para enfrentar escenarios de vulnerabilidad climática y degradación ambiental.

Desde una perspectiva metodológica, la investigación demuestra la pertinencia de integrar herramientas interdisciplinarias como análisis de redes sociales, diagnóstico participativo, análisis territorial y procesos de backcasting para comprender fenómenos complejos de sostenibilidad rural. La combinación de métodos cuantitativos y cualitativos permitió fortalecer la comprensión integral de las dinámicas socioecológicas presentes en el territorio de estudio.

De igual manera, la investigación contribuye al debate científico contemporáneo sobre transición socio-técnica y sostenibilidad rural al articular enfoques provenientes de agroecología, resiliencia socioecológica y gobernanza adaptativa. Esta integración teórica permite superar aproximaciones fragmentadas y avanzar hacia modelos analíticos capaces de comprender la complejidad de los sistemas agroalimentarios contemporáneos.

En términos territoriales, el estudio concluye que el municipio de Atlautla presenta condiciones representativas de numerosos territorios rurales mexicanos afectados por vulnerabilidad climática, degradación ambiental y limitada articulación institucional. Por ello, las estrategias propuestas poseen potencial de adaptación y transferencia hacia otros contextos rurales de México y América Latina que enfrentan problemáticas similares.

Finalmente, la investigación sostiene que la transición agropecuaria resiliente constituye un proceso multidimensional que requiere fortalecer capacidades territoriales, gobernanza colaborativa y mecanismos de innovación participativa orientados a sostenibilidad, soberanía alimentaria y justicia socioambiental. Bajo esta perspectiva, el fortalecimiento de los sistemas agroalimentarios rurales dependerá de la capacidad colectiva para construir modelos territoriales basados en resiliencia, cooperación y sustentabilidad de largo plazo.

Bibliografía.

Libros

Altieri, M. A. (1995). *Agroecology: The science of sustainable agriculture* (2nd ed.). Westview Press; IT Publications.

Ostrom, E. (1990). *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807763>

Artículos de revista

Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Elmqvist, T., Gunderson, L., & Holling, C. S. (2005). Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35(1), 557–581. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.021103.105711> ([doi.org in Bing](#))

Geels, F. W. (2004). From sectoral systems of innovation to socio-technical systems: Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory. *Research Policy*, 33(6–7), 897–920. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2004.01.015>

Gliessman, S. R. (2015). *Agroecology: The ecology of sustainable food systems* (3rd ed.). CRC Press.

Remans, R., et al. (2024). Participatory backcasting for agrifood system resilience. *Journal of Rural Studies*, 102(4), 45–60. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2024.01.005> ([doi.org in Bing](#))

Widayat, W., et al. (2023). Social network analysis in agrifood governance. *Sustainability*, 15(12), 10123. <https://doi.org/10.3390/su151210123> ([doi.org in Bing](#))

Scoones, I., Leach, M., & Newell, P. (2015). The politics of sustainability transitions. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 15, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2014.11.002> ([doi.org in Bing](#))

Fuentes electrónicas y reportes institucionales

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). *The state of food and agriculture 2021*. FAO. <https://www.fao.org/publications> ([fao.org in Bing](https://www.fao.org/publications))

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2> ([ipcc.ch in Bing](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2))

United Nations Development Programme (UNDP). (2022). *Human development report 2022*. UNDP. <https://hdr.undp.org>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2020). *Perspectivas del desarrollo rural en América Latina*. CEPAL. <https://www.cepal.org>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2022). *Diagnóstico del sector agropecuario en México*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/sader>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Censo de población y vivienda 2020*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx>

Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). (2022). *Informe de pobreza en México*. CONEVAL. <https://www.coneval.org.mx>

Diseño de una planta procesadora de frijol en Zacatecas para incrementar el valor agregado de la producción

Arlem Alejandra López Carrillo⁷

Resumen

El estado de Zacatecas constituye una de las principales regiones productoras de frijol en México; sin embargo, una parte importante de la producción se comercializa como materia prima con niveles limitados de transformación y valor agregado. Esta situación reduce las posibilidades de integración de los productores a eslabones agroindustriales de mayor rentabilidad. El objetivo de este trabajo fue desarrollar el diseño técnico preliminar de una planta procesadora de frijol en Zacatecas orientada a las operaciones de recepción, limpieza, clasificación, acondicionamiento, envasado y almacenamiento, considerando criterios de eficiencia operativa, inocuidad y aprovechamiento de la producción regional. La metodología comprendió el análisis documental de la producción nacional y estatal, la caracterización de la cadena de valor, la definición del proceso productivo, el balance preliminar de materiales, la selección de maquinaria y el diseño de la distribución de áreas mediante un escenario de capacidad de procesamiento. Los resultados muestran que la integración de las operaciones de limpieza, clasificación y envasado permite plantear un sistema de procesamiento continuo con separación de las áreas de materia prima, proceso y producto terminado. Asimismo, la ubicación de la planta en una zona productora puede disminuir recorridos logísticos y facilitar el abastecimiento directo de frijol. Se concluye que el diseño propuesto constituye una alternativa para avanzar de la comercialización de grano sin procesar hacia un esquema agroindustrial con mayor valor agregado, trazabilidad, calidad e integración regional.

Palabras clave: frijol, agroindustria, procesamiento, valor agregado, Zacatecas.

Abstract

Zacatecas is one of the main bean-producing regions in Mexico; however, a significant share of its production is marketed as raw agricultural material with limited processing and added value. This situation restricts producers' participation in more profitable agro-industrial stages of the value chain. The objective of this study was to develop a preliminary technical design for a bean processing plant in Zacatecas focused on receiving, cleaning, grading, conditioning, packaging, and storage operations, considering operational efficiency, food safety, and the utilization of regional production. The methodology included a documentary analysis of national and state bean production, characterization of the value chain, definition of the

⁷ arlemcarrillo2705@gmail.com

production process, preliminary material balance, equipment selection, and facility layout under a proposed processing-capacity scenario. The results indicate that integrating cleaning, grading, and packaging operations makes it possible to establish a continuous processing system with differentiated areas for raw materials, processing, and finished products. In addition, locating the plant close to bean-producing areas could reduce logistical distances and facilitate direct raw-material procurement. It is concluded that the proposed design represents an alternative for moving from the commercialization of unprocessed grain toward an agro-industrial system that generates greater added value, traceability, product quality, and stronger regional integration.

Keywords: beans, agroindustry, processing, added value, Zacatecas.

Introducción

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) representa uno de los productos agrícolas de mayor importancia económica, social y alimentaria de México. Su relevancia deriva tanto de su participación histórica en la dieta de la población como de la superficie destinada a su cultivo y del número de productores involucrados en su producción [1], [2].

Dentro del contexto nacional, Zacatecas se distingue por su especialización en la producción de frijol. Datos oficiales han ubicado históricamente al estado como el principal productor nacional; por ejemplo, en 2021 aportó aproximadamente 35 % de la producción mexicana, con más de 451 mil toneladas [3]. La información agrícola oficial disponible permite consultar registros de producción por entidad, municipio, ciclo, modalidad y cultivo, lo que facilita evaluar espacialmente alternativas de localización de infraestructura agroindustrial [4].

No obstante, la importancia productiva del estado no necesariamente se traduce en una incorporación equivalente de valor agregado. Una parte del frijol sigue una cadena basada fundamentalmente en producción, acopio, intermediación y comercialización del grano. Los estudios sobre mercados y rentabilidad del frijol en Zacatecas muestran que los precios, los costos de producción y la articulación comercial influyen de forma importante en los ingresos de los productores [5], [6].

El desarrollo de infraestructura agroindustrial representa una opción para incrementar el grado de transformación del producto antes de su incorporación al mercado. En el caso del frijol, operaciones como recepción, limpieza, separación de impurezas, clasificación, control de humedad, envasado, etiquetado y almacenamiento permiten pasar del grano comercializado a granel a presentaciones homogéneas con características definidas de calidad, peso, identificación y trazabilidad. La planeación sistemática de instalaciones establece que el arreglo físico debe relacionar flujo de materiales, equipos, áreas y movimientos para reducir recorridos y mejorar la eficiencia del proceso [7].

Desde la perspectiva de diseño industrial, una planta procesadora debe integrar de manera lógica las operaciones unitarias, equipos, flujo de materiales, trabajadores, servicios y espacios físicos. La distribución debe reducir movimientos innecesarios y prevenir cruces entre materia prima, residuos, producto procesado y producto terminado [7]. De igual forma, la instalación debe cumplir con las disposiciones sanitarias aplicables, entre ellas la NOM-251-SSA1-2009 para prácticas de higiene [8] y la NOM-051-SCFI/SSA1-2010, con sus modificaciones, para el etiquetado de alimentos preenvasados [9].

En este contexto, el problema central abordado en esta investigación corresponde a la limitada transformación agroindustrial de una materia prima producida ampliamente en Zacatecas y a la necesidad de establecer criterios técnicos para diseñar una infraestructura de procesamiento que permita integrar actividades de acondicionamiento y envasado .

La hipótesis de trabajo establece que el diseño de una planta procesadora de frijol con una distribución eficiente de las operaciones de recepción, limpieza, clasificación y envasado permitirá mejorar la eficiencia del proceso y crear condiciones para incrementar el valor agregado de la producción de frijol en Zacatecas.

El objetivo general fue diseñar una planta procesadora de frijol en Zacatecas orientada a incrementar el valor agregado mediante procesos eficientes de recepción, limpieza, clasificación y envasado

Los objetivos específicos fueron:

- Analizar la producción y la cadena de valor del frijol en México, con énfasis en Zacatecas
- Definir las operaciones necesarias para el procesamiento y acondicionamiento industrial del frijol.
- Determinar los principales equipos requeridos para la planta.
- Diseñar el flujo del proceso y la distribución preliminar de las áreas productivas.
- Establecer criterios para evaluar posteriormente la factibilidad técnica y económica del diseño.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se planteó para el estado de Zacatecas, México. La selección se fundamentó en su especialización productiva en frijol y en su participación histórica dentro de la producción nacional [3], [4].

Para una fase posterior de localización específica se propone analizar municipios con elevada producción y adecuada conectividad carretera considerando variables como volumen disponible de materia prima, distancia respecto de los productores, infraestructura carretera, disponibilidad de energía eléctrica, agua, mano de obra y cercanía con los mercados potenciales. La selección de la localización deberá apoyarse en información agrícola municipal y en criterios de distribución de planta y flujo de materiales [4], [7].

Tipo de investigación

La investigación se planteó bajo un enfoque cuantitativo, descriptivo y aplicado, debido a que utiliza información estadística y parámetros técnicos para desarrollar una propuesta de diseño agroindustrial. Los datos de producción y abastecimiento se obtendrán principalmente de fuentes oficiales de información agrícola [4].

La metodología se estructuró en cinco etapas: análisis de la producción de frijol; análisis de la cadena de valor; diseño del proceso productivo; selección preliminar de equipos; y distribución de planta [3]-[8].

Diseño del proceso productivo

Se definió un flujo basado en las operaciones necesarias para transformar el grano proveniente del productor en un producto limpio, clasificado y acondicionado para su comercialización. La secuencia propuesta responde a criterios de flujo continuo, reducción de movimientos y separación funcional de áreas [7], así como a prácticas generales de higiene aplicables al procesamiento de alimentos [8].

Recepción de materia prima → Pesaje → Muestreo y control de calidad → Prelimpieza → Limpieza y separación de impurezas → Clasificación por tamaño y calidad → Inspección → Envasado → Sellado → Etiquetado → Almacenamiento → Distribución [7], [8].

Recepción y control de materia prima

El frijol recibido debe ser pesado e identificado de acuerdo con su procedencia, variedad, lote y fecha de recepción. Posteriormente debe realizarse un muestreo inicial para establecer sus condiciones físicas y determinar la presencia de impurezas, material extraño, granos dañados y contenido de humedad. El registro por lotes contribuye al control del proceso y a la trazabilidad del producto [8].

Limpieza

La limpieza está orientada a la separación de residuos vegetales, polvo, piedras, terrones y otros materiales diferentes al grano. Para el diseño se considera una combinación de cribado, aspiración y separación física [7], [8].

Clasificación

Después de la limpieza, el frijol es clasificado para obtener lotes con mayor homogeneidad. Dependiendo del nivel tecnológico de la instalación, pueden emplearse cribas por dimensión, mesas de selección o sistemas ópticos de clasificación por color [7], [8].

Envasado

El frijol acondicionado se conduce a tolvas de alimentación para posteriormente dosificarse de acuerdo con el peso establecido para cada presentación comercial. Como escenario de diseño se consideran presentaciones de 1 kg, 5 kg y 25 kg [7]-[9].

Almacenamiento

El producto terminado se almacena temporalmente en un área independiente de la recepción de materia prima. Los productos se organizan por lote y fecha de producción para facilitar su trazabilidad y rotación. La separación entre materias primas y producto terminado forma parte de las medidas de higiene y control que deben considerarse en el diseño de la instalación [8].

Distribución de planta

Como escenario preliminar se considera una superficie de 240 m², con dimensiones aproximadas de 12 × 20 m. La distribución de esta superficie debe priorizar relaciones de proximidad entre operaciones consecutivas, reducción de recorridos y ausencia de cruces innecesarios en el flujo del material [7].

Área	Función principal
Recepción	Descarga y control del frijol
Materia prima	Almacenamiento temporal
Limpieza	Separación de impurezas
Clasificación	Homogeneización del producto
Control de calidad	Inspección y muestreo
Envasado	Dosificación y sellado
Etiquetado	Identificación comercial
Producto terminado	Almacenamiento
Servicios	Higiene y servicios del personal
Administración	Control documental y operativo

Balance preliminar de materia

Para establecer la capacidad de la línea se plantea un balance general: [7].

$$MP = PT + R + P$$

donde MP = materia prima recibida; PT = producto terminado; R = residuos e impurezas retiradas; y P = pérdidas asociadas al proceso [7].

La eficiencia global puede expresarse como: [7].

$$\eta = (PT / MP) \times 100$$

Los valores definitivos de rendimiento deberán determinarse mediante pruebas con lotes reales de frijol y no deben considerarse como resultados experimentales hasta concluir esa etapa [7].

Capacidad de procesamiento

Como escenario inicial para efectuar el dimensionamiento se plantea una capacidad anual de referencia de 2,500 toneladas de frijol [3], [4], [7].

$$Q_d = Q_a / D$$

donde Qd = capacidad diaria requerida; Qa = cantidad anual programada; D = días efectivos de operación durante el año [7].

$$Q_h = Q_d / H$$

donde Qh = capacidad horaria requerida y H = número efectivo de horas de procesamiento por día [7].

Resultados y discusión

Producción como fundamento para la instalación

El análisis documental confirma la importancia de Zacatecas dentro de la producción mexicana de frijol. Las estadísticas oficiales han registrado participaciones estatales muy relevantes; en 2021, Zacatecas aportó aproximadamente 35 % de la producción nacional y superó las 451 mil toneladas [3]. Los registros oficiales del Anuario Estadístico de la Producción Agrícola permiten complementar este análisis mediante series por entidad y municipio [4].

Las cifras pueden variar considerablemente entre ciclos debido a factores productivos, climáticos y de mercado. En consecuencia, el dimensionamiento debe utilizar series históricas y escenarios de abastecimiento para evitar tanto capacidad ociosa como cuellos de botella. La literatura sobre rentabilidad

y formación de precios del frijol confirma que las condiciones productivas y comerciales pueden modificar los resultados económicos de los productores [5], [6], [10].

Propuesta de flujo del proceso

El primer resultado del diseño corresponde a la estructuración de un flujo continuo: Recepción → Pesaje → Control de calidad → Limpieza → Clasificación → Inspección → Envasado → Sellado → Etiquetado → Almacenamiento [7], [8].

Esta organización presenta la ventaja de que el producto avanza progresivamente desde una condición de mayor presencia de impurezas hacia áreas destinadas exclusivamente al producto acondicionado. El flujo lineal también facilita el diseño de mecanismos de trazabilidad y reduce recorridos internos, en concordancia con principios de planeación de instalaciones y prácticas higiénicas [7], [8].

Valor agregado

El diseño de la planta no modifica la producción primaria del frijol; su principal contribución se encuentra después de la cosecha. El grano recibido puede pasar de ser un producto agrícola comercializado principalmente a granel a convertirse en un producto limpio, seleccionado, clasificado, con peso estandarizado, envasado, etiquetado e identificado por lote. Estas operaciones permiten incorporar actividades de acondicionamiento y presentación comercial dentro de la región productora [5], [6].

Este cambio representa una incorporación de funciones a la cadena de valor que puede contribuir a que una mayor parte del valor asociado al acondicionamiento y comercialización permanezca dentro de la región productora. La evidencia sobre mercados de frijol muestra que la transmisión de precios y las condiciones de comercialización son variables relevantes para analizar la distribución del valor entre regiones productoras y centros de consumo [5].

Abastecimiento

La adquisición de materia prima constituye uno de los componentes fundamentales del proyecto. Se propone una estrategia basada en compras directas a productores y organizaciones agrícolas, con criterios de calidad, recepción por lotes, registro de procedencia, diversificación de proveedores y acuerdos de abastecimiento. Esta estrategia debe considerar la variación de precios y las condiciones de mercado observadas en la cadena del frijol [5], [10].

Inocuidad y cumplimiento normativo

La propuesta integra desde la etapa de diseño los principios generales de higiene aplicables al procesamiento de alimentos. La NOM-251-SSA1-2009 establece requisitos mínimos de buenas prácticas

de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios, por lo que constituye una referencia central para definir condiciones de instalaciones, equipos, almacenamiento, limpieza y manejo del producto [8].

Para el producto preenvasado también deberá verificarse la información comercial y sanitaria correspondiente conforme a la NOM-051-SCFI/SSA1-2010 y sus modificaciones vigentes, que regulan el etiquetado de alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasados destinados al consumidor [9].

Implicaciones económicas

La rentabilidad de la planta dependerá principalmente del precio de compra del frijol, cantidad procesada, porcentaje de producto comercializable, precio del producto envasado, costos de mano de obra, energía, materiales de empaque, transporte, mantenimiento y nivel de utilización de los equipos. Estudios realizados en Zacatecas muestran que los costos y precios de comercialización son determinantes para la rentabilidad del frijol [6], mientras que investigaciones recientes evidencian la influencia de mecanismos de precios de garantía sobre el precio medio rural [10].

En esta etapa los resultados son de diseño preliminar, por lo que no sería metodológicamente correcto afirmar todavía que la planta es económicamente rentable sin integrar precios reales de maquinaria, costos de construcción, capital de trabajo, volúmenes efectivos de abastecimiento y precios de venta [5], [6], [10].

Equipamiento preliminar

Equipo	Función
Báscula de recepción	Cuantificación de materia prima
Tolva de recepción	Alimentación inicial
Elevadores o transportadores	Movimiento de producto
Cribadora	Eliminación de impurezas
Deschinadora	Separación de piedras
Sistema de aspiración	Eliminación de polvo y materiales ligeros
Clasificadora	Separación por dimensiones
Mesa de selección	Inspección de calidad
Tolva de producto limpio	Alimentación del envasado
Dosificadora	Control de peso
Selladora	Cierre de envases
Etiquetadora	Identificación
Báscula de verificación	Control de peso final

Conclusiones

Zacatecas presenta condiciones productivas que justifican el análisis de alternativas para incrementar la transformación agroindustrial del frijol, debido a su relevancia histórica dentro de la producción nacional [3], [4].

El diseño preliminar permitió estructurar una planta basada en una secuencia de recepción, pesaje, control de calidad, limpieza, clasificación, inspección, envasado, etiquetado y almacenamiento, estableciendo un flujo progresivo desde la materia prima hasta el producto terminado [7], [8].

La separación física de áreas facilita el control de materiales, la trazabilidad del producto y la aplicación de prácticas de higiene durante el procesamiento, en concordancia con los criterios generales de distribución de instalaciones [7] y las disposiciones sanitarias aplicables [8].

La incorporación de limpieza, clasificación, presentación comercial y trazabilidad permite incrementar el número de operaciones realizadas en la región productora y genera condiciones para que una mayor parte del valor asociado al acondicionamiento y comercialización permanezca dentro de la cadena regional [5]-[7].

El escenario de capacidad de 2,500 toneladas anuales constituye únicamente un punto de partida para el dimensionamiento y deberá validarse mediante análisis de disponibilidad histórica de materia prima, demanda potencial, utilización de equipos y abastecimiento [3]-[7].

La siguiente fase de investigación deberá incorporar simulación del proceso, balance detallado de materia, selección y cotización de maquinaria, comparación de alternativas de localización, análisis logístico y evaluación económica mediante indicadores financieros [5]-[7], [10].

Finalmente, el diseño de una planta procesadora representa una alternativa técnicamente estructurable para fortalecer la transformación del frijol producido en Zacatecas; sin embargo, su viabilidad definitiva deberá comprobarse con información técnica, comercial y financiera obtenida específicamente para el proyecto [3]-[8].

Referencias

- [1] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, “El frijol mexicano: variedades rositas, negros y pintos,” Gobierno de México, 28 mayo 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-frijol-mexicano-variedades-rositas-negros-y-pintos>. [Consultado: 12-ago-2026].
- [2] M. Espinosa-Rodríguez, J. E. Sabino-López, et al., “Caracterización socioeconómica y productiva de productores de frijol nativo en Guerrero,” Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, vol. 16, no. 2, e3541, 2025, doi: 10.29312/remexca.v16i2.3541.
- [3] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, “La importancia de la producción de frijol en México,” Gobierno de México, 26 oct. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/la-importancia-de-la-produccion-de-frijol-en-mexico>. [Consultado: 12-ago-2026].

- [4] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, “Anuario Estadístico de la Producción Agrícola,” Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria. [En línea]. Disponible en: https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/. [Consultado: 12-ago-2026].
- [5] A. Aguilar-López and S. González-Andrade, “Análisis de simetría en la transmisión de precios de mercado del frijol negro en México: casos Zacatecas y Ciudad de México,” *Acta Universitaria*, vol. 34, e4064, pp. 1-15, 2024, doi: 10.15174/au.2024.4064.
- [6] C. J. Carrillo Martínez, G. Álvarez Fuentes, G. Aguilar Benítez, J. C. García López and C. Contreras Servín, “Rentabilidad de la producción de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), maíz (*Zea mays* L.) y chile (*Capsicum annuum*) en el municipio de Morelos, Zacatecas,” *Acta Universitaria*, vol. 29, pp. 1-16, 2019, doi: 10.15174/au.2019.1984.
- [7] R. Muther and L. Hales, *Systematic Layout Planning*, 4th ed. Marietta, GA, USA: Management & Industrial Research Publications, 2015.
- [8] Secretaría de Salud, “Norma Oficial Mexicana NOM-251-SSA1-2009, Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios,” *Diario Oficial de la Federación*, México, 2009.
- [9] Secretaría de Economía y Secretaría de Salud, “Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-051-SCFI/SSA1-2010, Especificaciones generales de etiquetado para alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasados—Información comercial y sanitaria,” *Diario Oficial de la Federación*, México, 27 mar. 2020.
- [10] M. A. Caballero-García, V. H. Santoyo-Cortés, J. Ramírez-Galindo and C. Rebollar-Ávila, “Efectos del precio de garantía sobre el precio medio rural del frijol en México,” *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 16, no. 2, e3645, 2025, doi: 10.29312/remexca.v16i2.3645.