



ISSN: 2992-7447

Año 5. Vol. 3 Núm. 3 Edición Especial 2025

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México

**Mejora continua en la calidad del producto:
propuesta de integración de herramientas lean
manufacturing a la norma IATF 16949**

**Análisis de la cadena de suministro en la industria
automotriz: estrategias para mejorar la eficiencia
y reducir costos**

**Optimizing primary care networks in Guanajuato:
planning and allocation of services**

**Reabastecimiento conjunto para la gestión de
inventarios de partes de repuesto: caso de estudio**

**Implementación de un sistema de control de
temperatura y humedad en un Invernadero
Ejidal con IoT**





Universidad Autónoma del Estado de México

Consejo Editorial

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Directora: Dra. Rosa María Valdovinos Rosas ORCID 0000-0001-9954-0653
Editora técnica: Dra. Mireya Salgado Gallegos ORCID 0000-0003-2675-9456
Editor técnico: Dr. Javier Salas García ORCID 0000-0002-1297-7893

Universidad Católica de Murcia, España

Editora científica: Dra. Angélica Guzmán Ponce ORCID 0000-0002-7844-1266

Comité Científico

Ingeniería y tecnología civil y en arquitectura

Dr. Francisco Héctor Bañuelos García – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0002-8231-6599
Dr. Héctor Rodrigo Amezcua Rivera – Facultad de Ingeniería UNAM, México ORCID 0000-0002-5991-0020
Dr. Marco Antonio Escamilla García – Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México ORCID 0000-0001-5276-4369

Ingeniería y tecnología en Ciencias Computacionales e Inteligencia Artificial

Dra. Juana Canul Reich – Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México ORCID 0000-0003-1893-1332
Dr. Daniel Valero Carreras – Universidad Católica de Murcia, España ORCID 0000-0002-9025-9950
Dr. Antonio Jesús Banegas Luna – Universidad Católica de Murcia, España ORCID 0000-0003-1158-8877

Ingeniería y tecnología en Mecánica y Sistemas Energéticos

Dra. María Dolores Durán García – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0002-7569-249X
Dr. Álvaro Eduardo Lentz Herrera – Universidad Autónoma de la Ciudad de México, México ORCID 0009-0008-9460-2251

Ingeniería y tecnología en Ciencias del Agua

Dr. Juan Manuel Esquivel Martínez – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0003-1864-4501
Dra. Edith Rosalba Salcedo Sánchez – Universidad Autónoma de Guerrero, México ORCID 0000-0003-2559-5306
Dra. Laura Conde Baéz - Universidad Autónoma de Guerrero, México ORCID 0000-0003-0250-7916

Ingeniería y tecnología en Cadena de Suministro

Dra. Lourdes Loza Hernández – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0001-5107-7110
Dr. Manuel González de la Rosa – Tecnológico Nacional Campus Toluca, México ORCID 0009-0000-6558-6493
Dr. Agustín Bustos Rosales – Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, México ORCID 0000-0001-5074-0355
Dr. Rodolfo Mendoza Gómez – Tecnológico de Monterrey Campus León, México ORCID 0000-0002-9119-3412

Ingeniería y tecnología en Robótica, Mecatrónica, Industria 4.0 y Biomédica

Dr. Juan Manuel Jacinto Villegas – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0002-0964-4844
Dra. Nadia Vanessa García Hernández – CINVESTAV, Unidad Saltillo, México ORCID 0000-0003-1944-0519
Dr. Oscar Osvaldo Sandoval González – Instituto Tecnológico de Orizaba, México ORCID 0000-0002-0309-5231
En cada número de la revista se cuenta con un editor invitado adscrito a una institución de educación superior de prestigio.

Editor Invitado

Dr. Rodolfo Mendoza Gomez
Tecnológico de Monterrey, Michael Jinwoo Park, Tecnológico de Monterrey

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, Año 5, Vol. 3, Núm. 3, 2025, es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Literario 100 Ote., Colonia Centro, Toluca, Estado de México, C.P. 50000, Tels. 7222-14-08-55, <https://hemeroteca.uaemex.mx/index.php/ideasingeneria>, ideasencienciai_fi@uaemex.mx. Directora: Rosa María Valdovinos Rosas, Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, Cerro de Coatepec s/n, Toluca, Estado de México, C.P. 50130, Tel. 7222140855. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo no. 04-2023-033108322300-102, ISSN: 2992-7447, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). Responsables de la última actualización de este número, Mireya Salgado Gallegos y Javier Salas García, Facultad de Ingeniería. Diseño de portada y Diseño Editorial, Javier Salas García. Fecha de última modificación: 10 de octubre de 2025.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Se autoriza la reproducción total o parcial del contenido aquí publicado sin fines de lucro, siempre y cuando no se modifique, se cite la fuente completa y su dirección electrónica en términos de licencia aplicable. Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional (CC BY-NC). Hecho en México, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX), 2025.



CONTENIDO

Pág.

Carta del Editor

Dr. Rodolfo Mendoza-Gómez

2

Mejora continua en la calidad del producto: Propuesta de integración de herramientas Lean Manufacturing a la norma IATF 16949

Palacios Ortega, M.* ; Mosiño, J. F.; Escobedo Rodríguez, P.A.; Reyes Plascencia, A. R.

4

Análisis de la cadena de suministro en la industria automotriz: Estrategias para mejorar la eficiencia y reducir costos

Flores-Plascencia, G.M.; Pulido-Ruiz, F.D.; Delgado-Franco, E.G.; Palacios-Ortega, M.; Rojas-Mancera, E.

18

Optimizing primary care networks in Guanajuato: planning and allocation of services

Park, M. J.; Mendoza-Gómez, R.*

32

Reabastecimiento conjunto para la gestión de inventarios de partes de repuesto: Caso de estudio

Sánchez Guzmán, V.; Loza-Hernandez, L.*; Bustos Rosales, A.; Vázquez Aranda, S.

55

Implementación de un Sistema de Control de Temperatura y humedad en un Invernadero Ejidal con lot

Padilla-Macías, E., Ortiz-Aguilar, L.*, Funes-Tapia, J., Xoca-Orozco, L.

73

Carta del Editor

Dr. Rodolfo Mendoza-Gómez

Editor Invitado

Ideas en Ciencias de la Ingeniería



La cadena de suministro se ha consolidado como un eje estratégico fundamental para la ingeniería contemporánea. En un mundo definido por disrupciones constantes, presiones de costos y demandas sociales crecientes, la necesidad de generar enfoques innovadores que optimicen recursos y garanticen la continuidad de bienes y servicios esenciales es más urgente que nunca. Por ello, con gran entusiasmo presentamos este volumen especial de *Ideas en Ciencias de la Ingeniería*.

Este número ofrece una selección de investigaciones que reflejan la diversidad de aproximaciones dentro del campo de la cadena de suministro. Desde el ámbito industrial, se analizan propuestas para integrar marcos normativos internacionales con metodologías de mejora continua, así como estrategias que fortalecen la eficiencia logística mediante pronósticos, evaluaciones a proveedores y esquemas de control de procesos. Estas contribuciones reafirman que la ingeniería de operaciones no solo se enfoca en reducir costos, sino también en generar sistemas más ágiles, resilientes y sostenibles.

En el sector salud, se presenta un enfoque cuantitativo para el diseño y planeación de redes de atención primaria, que combina modelos de localización, asignación de capacidad y cobertura de servicios con restricciones presupuestales. Esta investigación muestra cómo los problemas de logística en salud pueden abordarse con herramientas propias del diseño de redes de suministro, ofreciendo soluciones prácticas y escalables para entornos urbanos y rurales, y contribuyendo al acceso equitativo y a la calidad en la atención sanitaria.

Por otro lado, se abordan los retos asociados a la gestión de inventarios en la industria automotriz, destacando la relevancia de combinar análisis estadísticos de la demanda con políticas de reabastecimiento que reduzcan costos y aseguren la disponibilidad de partes críticas. Estos estudios evidencian la importancia de conectar el análisis matemático con la toma de decisiones operativas, garantizando un equilibrio entre eficiencia y servicio al cliente.

Finalmente, se incluye un trabajo que trasciende el ámbito industrial para explorar cómo el Internet de las Cosas y los sistemas de monitoreo en tiempo real pueden contribuir a la agricultura de precisión. Mediante el desarrollo de soluciones de bajo

costo, se demuestra que la digitalización de procesos agrícolas es también parte de la cadena de suministro, al mejorar la productividad, reducir desperdicios y brindar herramientas tecnológicas accesibles a pequeños productores.

Estos aportes se inscriben perfectamente en el marco de la **Industria 5.0**, una visión que nos impulsa a ir más allá de la automatización y la digitalización. Esta perspectiva enfatiza la colaboración efectiva entre humanos y tecnologías inteligentes, la sostenibilidad ambiental y la resiliencia de los sistemas productivos. Bajo este lente, las cadenas de suministro ya no se conciben únicamente como engranajes de eficiencia económica, sino como plataformas de alto impacto que deben generar valor social, bienestar humano y equilibrio con el entorno.

La riqueza de estas contribuciones reside no solo en sus resultados técnicos, sino en la visión integradora y optimista que ofrecen para comprender la cadena de suministro como un sistema complejo y dinámico. Confiamos en que este número inspire a los lectores a reflexionar sobre el papel de la ingeniería en la transformación de las cadenas de suministro hacia modelos más eficientes, equitativos y sostenibles. Los invitamos a recorrer cada contribución con la convicción de que el conocimiento aquí presentado es una fuente sólida para la innovación aplicada y la mejora continua en beneficio de la industria, la sociedad y el medio ambiente.

Atentamente,

Dr. Rodolfo Mendoza-Gómez
Editor Invitado
Ideas en Ciencias de la Ingeniería

Mejora continua en la calidad del producto: Propuesta de integración de herramientas Lean Manufacturing a la norma IATF 16949

Continuous improvement in product quality: Proposal for the integration of Lean Manufacturing tools to the IATF 16949 standard

Palacios Ortega, M.*¹, Mosiño, J. F.¹, Escobedo Rodríguez, P.A.², Reyes Plascencia, A. R.¹
(*marcela.po@purisima.tecnm.mx)

Recibido: 09-06-2025 Aceptado: 09-09-2025

RESUMEN

En el presente documento se desarrolla la propuesta de investigación que consiste en el desarrollo de un estudio comparativo entre las normas de calidad Norma ISO/IATF 16949 en la Industria Automotriz y la semejanza con las herramientas de manufactura esbelta. Se ilustra cómo las empresas automotrices pueden integrar elementos de la norma ISO/IATF 16949 con las herramientas de manufactura esbelta para lograr mejoras significativas en la calidad del producto, reducir costos y aumentar la eficiencia operativa. La metodología propuesta es el ciclo PHVA. Dicha metodología se desarrolla en cuatro etapas Planear, Hacer, Verificar y Actuar que consisten

en: En la primera etapa, Planear, se definen los objetivos, en la etapa Hacer se realiza el estudio comparativo entre la norma ISO 16949 y la semejanza con las herramientas de mejora continua Lean Manufacturing, mientras que, en la etapa de Verificar, se analiza cómo es posible integrar las herramientas Lean a las normas considerando la similitud, y finalmente, en la etapa de Actuar, se establecen mecanismos para integrar la adopción de herramientas Lean a la normatividad ISO.

Palabras clave: Mejora continua, Lean Manufacturing, Calidad, Norma ISO.

ABSTRACT

This document develops the research proposal that consists of the development of a comparative study between the ISO/IATF 16949 quality standards in the Automotive Industry and the similarity with lean manufacturing tools. It

illustrates how automotive companies can integrate elements of ISO/IATF 16949 with lean manufacturing tools to achieve significant improvements in product quality, reduce costs, and increase operational efficiency. The

¹ Tecnológico Nacional de México/ITS de Purísima del Rincón.

² Universidad Politécnica del Bicentenario.



proposed methodology is the PHVA cycle. This methodology is developed in four stages: Plan, Do, Verify and Act, which consist of: In the first stage, Plan, the objectives are defined, in the Do stage, the comparative study between the ISO 16949 standard and the similarity with the Lean Manufacturing continuous improvement tools is carried out, while, in the Verify stage, it will be

analyzed how it is possible to integrate Lean tools into the standards considering the similarity, and finally, in the Act stage, mechanisms will be established to integrate the adoption of Lean tools into ISO regulations.

Keywords: Continuous Improvement, Lean Manufacturing, Quality, ISO Standard.

INTRODUCCIÓN

En el entorno actual, la industria automotriz se enfrenta a retos complejos, entre los que destaca la necesidad de garantizar altos niveles de satisfacción del cliente. Este aspecto resulta un eje estratégico para las organizaciones, donde los esfuerzos para alcanzar dicho objetivo inciden en la transformación y mejora constante del producto, del proceso y de los métodos de trabajo. En este contexto, el presente proyecto se establece como una propuesta innovadora orientada al diseño de una metodología que integre los requisitos de la norma ISO/IATF 16949 con herramientas de manufactura esbelta (Lean Manufacturing) con el objetivo de fortalecer los sistemas de gestión de calidad y optimizar el desempeño operativo.

En este estudio se analizan la norma ISO/IATF 16949 y diversas herramientas Lean, tales como el mapeo de la cadena de valor (VSM), el sistema 5S, el control visual, el SMED y el análisis causa-raíz. Esta comparación permitirá identificar puntos de convergencia que faciliten una implementación más efectiva de los requisitos normativos, alineados con una cultura de mejora continua.

El objetivo central del proyecto es formular una guía metodológica que permita incorporar herramientas Lean en el cumplimiento de los puntos auditables de la norma ISO/IATF 16949. Se busca con ello no solo facilitar la auditoría y estandarización de procesos, sino también generar soluciones prácticas que respondan a las necesidades específicas de la industria automotriz. Esta integración contribuirá a incrementar la calidad percibida del producto, reducir la variabilidad en los procesos y mejorar los tiempos de respuesta ante las exigencias del mercado, fortaleciendo así la competitividad de las organizaciones.

MARCO TEÓRICO

Norma del SGC Automotriz IATF 16949

Esta Norma del Sistema de Gestión de la Calidad (SGC) Automotriz, define los requisitos fundamentales del sistema de gestión de la calidad en las organizaciones que fabrican piezas de producción y piezas de servicio en la industria automotriz. Como tal, esta Norma del SGC Automotriz no puede considerarse una Norma del SGC por sí sola, sino que necesita entenderse como un suplemento de la Norma ISO

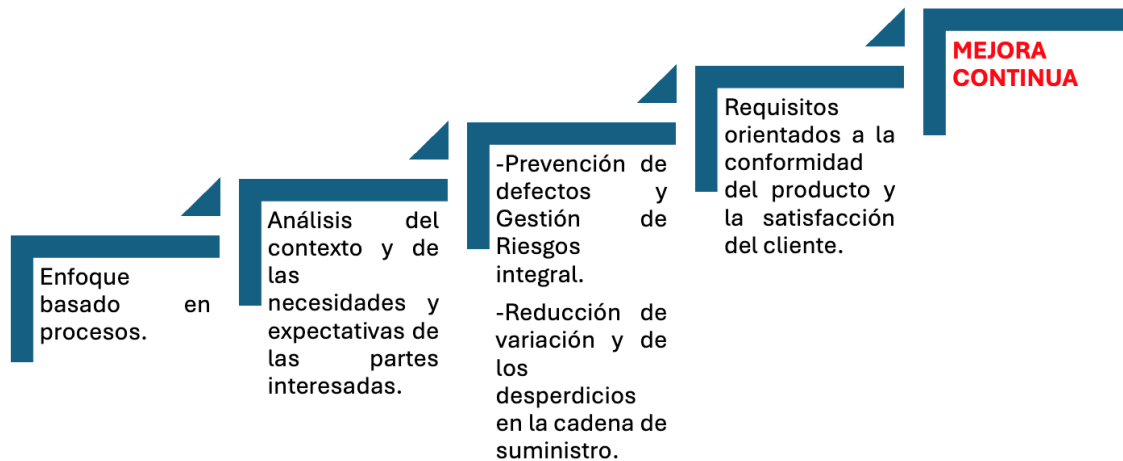


FIGURA 1: *Antecedentes de la mejora continua. Fuente: [1].*

9001:2015 y utilizarse junto con esta última [4]. Los antecedentes de la mejora continua según [1] se presentan en la Figura 1.

Orígenes de la norma IATF 16949

El origen de IATF 16949 surge como respuesta a la creciente necesidad de armonizar las diferentes evaluaciones y sistemas de certificación en la cadena de suministro global del sector automotriz. La primera edición fue la Especificación Técnica (TS) ISO/TS 16949 (primera edición) desarrollada originalmente en 1999 por el International Automotive Task Force (IATF). Luego, en 2016, fue reemplazada por IATF 16949, que redefine los requisitos de gestión de calidad para la industria automotriz [4].

Objetivo

El objetivo de esta Norma del SGC Automotriz es el desarrollo de un sistema de gestión de la calidad que tenga en cuenta la mejora continua, poniendo énfasis en la prevención de defectos y en la reducción de la variación y de los desperdicios en la cadena de suministro. Establece estándares de calidad para los proveedores directos que producen materiales, productos, componentes de servicio o servicios finales, como el procesamiento de tratamiento térmico y electrochapado [4].

Beneficios de implementar la norma IATF

Para [5], tanto empresas grandes como pequeñas han experimentado notables mejoras al incorporar el estándar 16949, identificando ahorros de costos y ganancias en eficiencia. En la Figura 2, se destacan siete beneficios clave y la razón de su importancia de acuerdo con [2]:

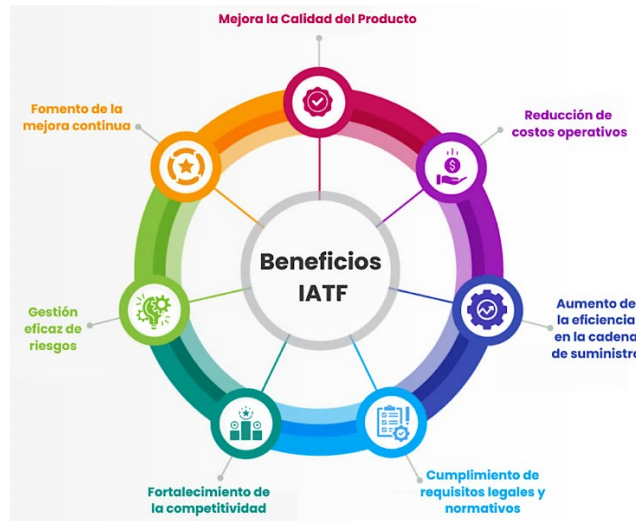


FIGURA 2: *Beneficio de implementar la IATF* Fuente: [2].

1. *Mejora la calidad del producto:* La IATF 16949 establece rigurosos estándares de calidad que, al implementarse correctamente, contribuyen a la producción de productos más consistentes y confiables. Esto no solo fortalece la satisfacción del cliente, sino que también posiciona a la organización como un referente en excelencia.
2. *Reduce costos operativos:* La eficiencia operativa es esencial en el entorno empresarial actual. La norma IATF 16949 proporciona herramientas y metodologías que permiten optimizar procesos, identificar áreas de mejora y, en última instancia, reducir los costos operativos.
3. *Aumenta la eficiencia de la cadena de suministro:* Al alinear los procesos con la IATF 16949, se establecen prácticas estandarizadas que mejoran la comunicación y la colaboración en toda la cadena de suministro. Esto no solo minimiza riesgos, sino que también agiliza la entrega de productos y servicios.
4. *Cumplimiento de requisitos legales y normativos:* La norma IATF 16949 garantiza que su organización cumpla con los requisitos legales y normativos en la industria automotriz. Esto no solo evita posibles sanciones, sino que también construye una reputación de confianza y responsabilidad.
5. *Fortalecimiento de la competitividad:* La certificación IATF 16949 no solo es un requisito del cliente, sino también un distintivo de calidad que destaca a su organización en un mercado cada vez más competitivo. Esto puede abrir nuevas oportunidades comerciales y mejorar la posición en la industria.
6. *Gestión eficaz de riesgos:* La norma IATF 16949 aborda de manera proactiva la gestión de riesgos, identificando posibles problemas antes de que se conviertan en crisis. Esto asegura una toma de decisiones informada y reduce la probabilidad de interrupciones en la producción.
7. *Fomento de la mejora continua:* La IATF 16949 no es solo un punto de llegada, sino un compromiso continuo con la mejora. Al adoptar un enfoque de mejora continua, su organización

se posiciona para evolucionar con las demandas cambiantes del mercado y mantenerse a la vanguardia de la innovación y la eficiencia [2].

Herramientas principales en IATF 16949

Para garantizar la consistencia y fortalecer la colaboración en la cadena de suministro de la industria automotriz, IATF 16949 [1] proporciona cinco herramientas principales (Core tools) para vincular las operaciones de calidad en el diseño de productos, el diseño de procesos, la producción, la instalación y el servicio. Estas herramientas se especifican en la Figura 3.

Estructura de Alto Nivel (SL)

A partir de 2016, las empresas del sector automotriz debieron comenzar las adecuaciones pertinentes para migrar a la más reciente versión del estándar de gestión de calidad para la industria: IATF 16949:2016, que sustituye al ISO/TS 16949:2009 [4].

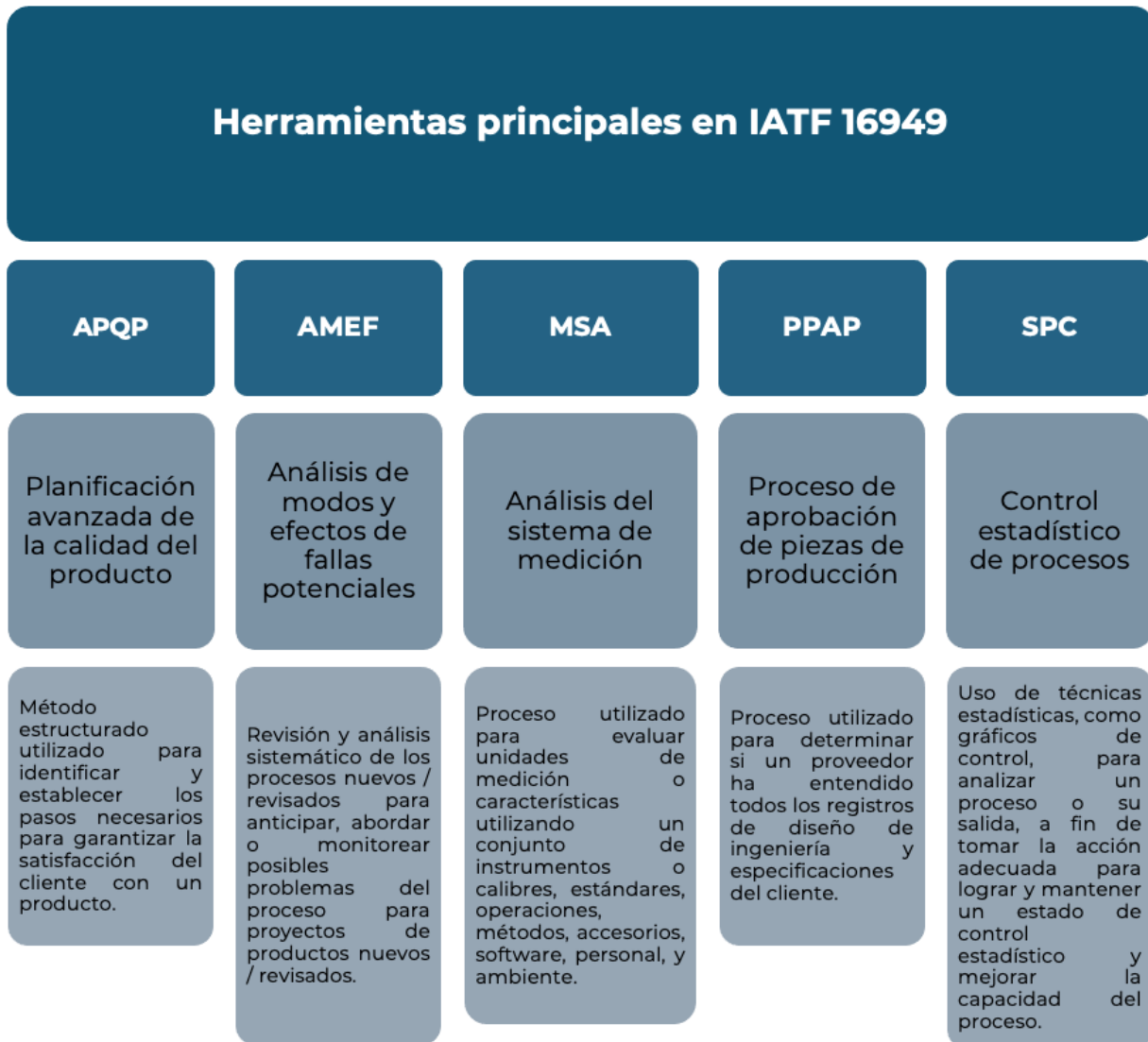


FIGURA 3: *Herramientas principales IATF 16949 Fuente: [2].*



FIGURA 4: Estructura de alto nivel Fuente: [6].

Esta “Estructura de Alto Nivel” aporta grandes beneficios a la integración de sistemas de gestión, el hecho de compartir una misma configuración del texto normativo ahorra tiempo y recursos a la hora de llevarla a cabo, a continuación, se ilustra de una manera más entendible para el usuario en la [Figura 4](#).

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada en el presente documento es el ciclo Deming (PHVA), instrumento enfocado en la resolución de problemas y mejora continua. Este comienza haciendo un diagnóstico inicial, detectando áreas de oportunidad con herramientas de mejora continua, analizando posibles soluciones y actuando respecto a las decisiones tomadas [3].

En la [Figura 5](#), se describen de forma general las etapas que conforman el ciclo de mejora (Planear, Hacer, Verificar y Actuar) y la aplicación al proyecto de investigación en cuestión.

Planear

Primera fase del ciclo, en la cual se definen los objetivos a alcanzar mediante la realización del proyecto.

1. Identificar y analizar cómo las empresas automotrices pueden integrar elementos de la norma de calidad ISO/IATF 16949 con las herramientas de manufactura esbelta para maximizar los beneficios y lograr resultados óptimos en términos de calidad del producto y competitividad empresarial.
2. Definir las similitudes entre la norma de calidad ISO/IATF 16949 con las herramientas de manufactura esbelta para lograr mejoras significativas en la calidad del producto.

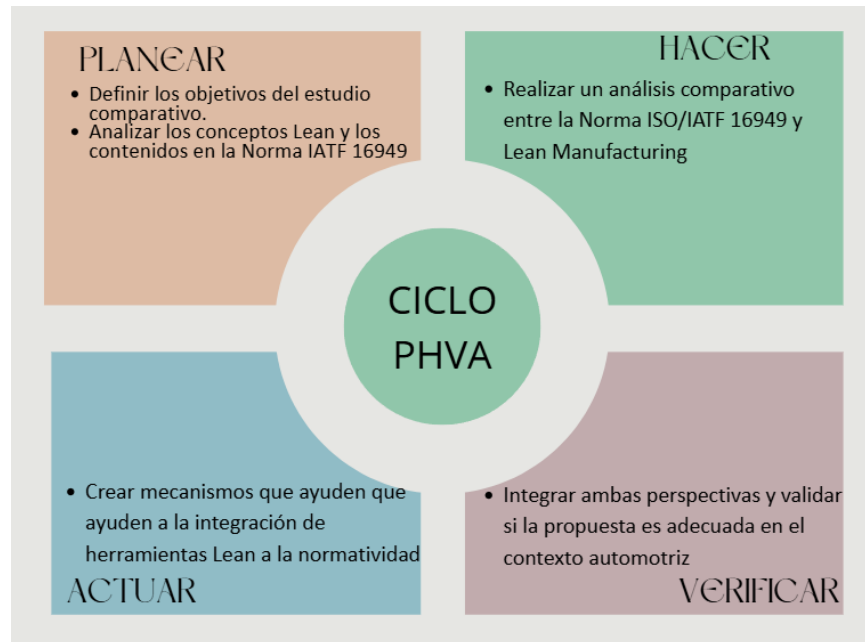


FIGURA 5: Estructura de alto nivel Fuente: Elaboración propia.

Hacer

Esta etapa permite crear estrategias de mejora en las empresas, por ello se realiza un análisis comparativo de la Norma ISO/IATF 16949 con Lean Manufacturing con la finalidad de crear un nuevo enfoque de proceso, donde la norma se vea aplicada con el uso herramientas de manufactura esbelta en la Tabla 1 se presenta dicho análisis.

En resumen, aunque la norma ISO/IATF 16949 y el Lean Manufacturing tienen enfoques diferentes, ambos comparten el objetivo común de mejorar la calidad del producto y la satisfacción del cliente. Mientras que la norma ISO/IATF 16949 establece requisitos específicos para la gestión de calidad en la industria automotriz, el Lean Manufacturing se centra en la eliminación de desperdicios y la creación de valor para el cliente a través de prácticas de mejora continua en toda la organización.

Verificar

Integrar ambas perspectivas puede ayudar a las empresas a mejorar su eficiencia operativa y competitividad en el mercado. Por lo que en esta tercera etapa será posible hacer dicha conjunción, donde se logren rescatar algunos puntos de la norma ISO/IATF 16949 y se implementen herramientas de acuerdo con los requisitos de esta.

FMEA – Análisis de Modo y Efecto de Fallas Potenciales

El Punto auditable 6 de la norma IATF16949 corresponde a la Planificación, dentro de este apartado se sugiere:

Tabla 1. Análisis comparativo de la Norma IATF 16949 y las herramientas Lean Manufacturing. Fuente: Elaboración propia.

Aspecto	Norma ISO/IATF 16949	Lean Manufacturing
Enfoque	Estándar de gestión de calidad para la industria automotriz, centrado en la calidad del producto y la satisfacción del cliente.	Filosofía de gestión empresarial que se enfoca en maximizar el valor para el cliente y minimizar el desperdicio a lo largo de toda la cadena de valor.
Objetivo principal	Mejora de la calidad del producto, reducción de defectos y satisfacción del cliente.	Mejora continua de la eficiencia operativa, eliminación de desperdicios y creación de valor para el cliente.
Principales requisitos	Establecimiento de un sistema de gestión de calidad, enfoque en el control de procesos y mejora continua.	Uso de herramientas y técnicas como el Kaizen, Just-in-Time (JIT), Poka-Yoke, Kanban y Value Stream Mapping (VSM) para eliminar desperdicios y mejorar la eficiencia.
Enfoque en la cadena de suministro	Requiere que los proveedores cumplan con estándares de calidad específicos y participen en actividades de mejora continua.	Se enfoca en la integración de proveedores y clientes para optimizar la cadena de suministro y reducir el tiempo y los costos de entrega.
Gestión de riesgos	Incorpora enfoques de gestión de riesgos para identificar y mitigar posibles problemas que puedan afectar la calidad del producto.	Utiliza herramientas como el Análisis de Modo y Efecto de Falla (FMEA) para identificar y prevenir posibles riesgos en los procesos.
Cultura organizacional	Promueve una cultura de calidad y mejora continua en toda la organización, con énfasis en la responsabilidad y participación de todos los empleados.	Fomenta una cultura de colaboración, empoderamiento y mejora continua en todos los niveles de la organización, donde se valora la retroalimentación y la resolución de problemas en equipo.

Implementar un Análisis de Modo y Efecto de Falla (FMEA) en el apartado de planificación del sistema de gestión de la calidad ayuda a identificar y mitigar riesgos potenciales que podrían afectar la calidad de los productos o servicios.

Al implementar un Análisis de Modo y Efecto de Falla para el apartado de planificación del sistema de gestión de la calidad, se puede identificar y abordar proactivamente los riesgos potenciales que podrían afectar la calidad de los productos o servicios. Esto permite mejorar la efectividad de los procesos de planificación y garantizar la satisfacción del cliente y el cumplimiento de los requisitos de calidad.

Para aplicar FMEA en la planificación del sistema de gestión de calidad, se debe formar un equipo multidisciplinario con conocimientos técnicos y del proceso. El equipo identificará posibles modos de falla en los procesos, evaluando sus efectos potenciales en la calidad, seguridad, eficiencia y satisfacción del cliente.

A cada modo de falla se le asignan puntuaciones de severidad, ocurrencia y detección, y se calcula el Número de Prioridad de Riesgo (RPN). Los modos con mayor RPN se priorizan y se desarrollan acciones para mitigar su impacto, reducir su probabilidad o mejorar su detección. Finalmente, se implementan y monitorean estas acciones para asegurar su efectividad.

Este enfoque permite anticipar riesgos, mejorar la planificación y asegurar el cumplimiento de los requisitos de calidad y la satisfacción del cliente.

KANBAN - Tarjetas

En el punto auditable 7.4 Comunicación de la norma IATF 16949, se propone:

Implementar tarjetas Kanban para el apartado de comunicación del sistema de gestión de la calidad puede mejorar la eficiencia y la transparencia en la comunicación interna y externa relacionada con la calidad.

Identificar necesidades de comunicación: Analizar los diferentes tipos de comunicación relacionados con la gestión de la calidad en la organización. Esto puede incluir comunicación entre departamentos, con proveedores y clientes, así como comunicación interna sobre cambios en los procesos, actualizaciones de documentos, problemas de calidad, etc.

Definir categorías de comunicación: Dividir las necesidades de comunicación identificadas en categorías claras y específicas.

Diseñar tarjetas Kanban: Crear tarjetas Kanban visualmente distintivas para cada categoría de comunicación identificada. En cada tarjeta, incluir información relevante como el tema de la comunicación, la fecha de vencimiento, el responsable, el estado actual y cualquier otra información pertinente.

Establecer tableros Kanban físicos o digitales: Crear tableros Kanban físicos en áreas comunes de trabajo para crear tableros virtuales. Divide el tablero en secciones correspondientes a las categorías de comunicación identificadas y coloca las tarjetas Kanban en la sección correspondiente según su estado actual.

Establecer reglas de flujo de trabajo: Definir reglas claras para el flujo de trabajo de las tarjetas Kanban, incluyendo quién es responsable de mover las tarjetas entre las diferentes secciones del tablero y cuándo se considera que una comunicación ha sido completada o cerrada.

Capacitar al personal: Proporciona capacitación al personal sobre cómo utilizar el sistema de tarjetas Kanban para gestionar la comunicación relacionada con la calidad. Se debe asegurar de que comprendan cómo crear nuevas tarjetas, moverlas a través del tablero y actualizar su estado según sea necesario.

Al implementar tarjetas Kanban para el apartado de comunicación del sistema de gestión de la calidad, se puede mejorar la visibilidad, la transparencia y la eficiencia en la gestión de la comunicación

relacionada con la calidad en la organización. Esto facilita una mejor coordinación entre los equipos, una respuesta más rápida a los problemas de calidad y una comunicación más efectiva con proveedores y clientes.

POKA - YOKE

En cuanto al apartado 7.5.1 Documentación del sistema de gestión de la calidad de la misma norma, se recomienda:

Implementar un Poka Yoke para la documentación del sistema de gestión de la calidad implica diseñar mecanismos que prevengan errores en la creación, revisión, almacenamiento y uso de documentos relacionados con la calidad.

Identificar puntos críticos de error: Analizar el proceso de documentación del sistema de gestión de calidad para identificar dónde podrían ocurrir errores. Esto puede incluir la creación de documentos, la revisión y aprobación, el almacenamiento y la recuperación de documentos, entre otros.

Analizar causas potenciales de errores: Identificar las posibles causas de errores en cada punto crítico identificado. Esto puede incluir factores como falta de claridad en las instrucciones, falta de capacitación del personal, problemas de comunicación, entre otros.

Diseñar controles Poka Yoke: Una vez identificadas las causas potenciales de errores, diseñar controles o mecanismos que prevengan la ocurrencia de estos errores. Por ejemplo, implementar controles visuales para asegurarse de que los documentos estén completos y correctos antes de ser aprobados o utilizar plantillas estandarizadas con campos obligatorios para reducir la posibilidad de errores durante la creación de documentos.

Automatizar procesos cuando sea posible: Donde sea posible, se recomienda utilizar herramientas tecnológicas para automatizar procesos de documentación y reducir la intervención humana. Por ejemplo, utilizar sistemas de gestión documental que permitan el seguimiento automatizado de versiones, la asignación de tareas y la notificación de vencimientos.

Capacitar al personal: Proporcionar capacitación adecuada al personal sobre los procedimientos y controles de documentación implementados y asegurar de que el personal comprenda la importancia del Poka Yoke en la prevención de errores y cómo utilizar los controles de manera efectiva.

Al efectuar un Poka Yoke para la documentación del sistema de gestión de calidad, se reduce la incidencia de errores, se mejora la eficiencia de los procesos y se garantiza la integridad y confiabilidad de los documentos relacionados con la calidad en la organización.

KPIS – Indicador Clave de Desempeño

En el punto auditable 9. Evaluación del desempeño de la norma automotriz.

Implementar Indicadores Clave de Desempeño (KPIs) para el apartado de evaluación del desempeño del sistema de gestión de la calidad es fundamental para medir el rendimiento y la eficacia del sistema en cumplir con los objetivos de calidad establecidos.

Definir los objetivos de calidad: Antes de seleccionar los KPIs, es importante tener claridad sobre los objetivos de calidad que se quieren alcanzar dentro del sistema de gestión en la industria automotriz. Estos objetivos pueden incluir la mejora de la satisfacción del cliente, la reducción de defectos, la optimización de procesos, entre otros. Para evaluar el desempeño del sistema de gestión de calidad, se deben identificar las áreas clave que impactan en los objetivos, como la satisfacción del cliente, la eficiencia y el cumplimiento normativo. Luego, se seleccionan KPIs relevantes y SMART que permitan medir estos aspectos, como la tasa de no conformidades o el tiempo de ciclo.

A cada KPI se le asignan metas y umbrales que sirvan como referencia para detectar desviaciones. Se deben implementar sistemas de seguimiento y reporte que faciliten la recolección y análisis de datos, así como revisar y ajustar periódicamente los KPIs para mantener su alineación con los objetivos de calidad.

Este proceso permite monitorear el rendimiento, detectar áreas de mejora y asegurar la mejora continua y la satisfacción del cliente.

Actuar

La cuarta etapa consiste principalmente en crear mecanismos que ayuden a la integración de herramientas Lean a la normatividad, por lo que se plantean los siguientes puntos que se pueden llevar a cabo después de cuatro etapas anteriores:

1. Tomar decisiones basadas en los resultados obtenidos
2. Implementar mejoras necesarias
3. Realizar un Checklist para identificar si cumple, o no; si este último será necesario ajustar y corregir según las necesidades de la empresa.
4. Aprender de los errores y evitar que se repitan.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos en este estudio están dados en la Tabla 2, donde se muestra de manera visual cada herramienta de manufactura esbelta opcional en el punto auditable de la ISO/IATF 16949. Se resalta entonces, que el implementar este nuevo pensamiento dependerá enteramente de las necesidades de la empresa y los objetivos a lograr.

CONCLUSIONES Y LÍNEAS ABIERTAS

En conclusión, las herramientas planteadas para utilizar en los puntos auditables de la norma ISO/IATF 16949, se asignaron, debido a que son las que muestran una mejor relación con cada punto, además de proporcionar metodologías prácticas para lograr los objetivos de la norma, al enfocarse en la reducción

Tabla 2. Resultados de la tabla comparativa. Fuente: Elaboración propia.

Punto auditable	Herramienta	Descripción	Herramienta Lean sugerida para integrar a la norma
6. Planificación	AMEF	El AMEF es una técnica ordenada para identificar y ayudar a minimizar situaciones potenciales, por lo que ayuda a identificar y mitigar riesgos potenciales que podrían afectar la calidad de los productos o servicios.	Se presenta el formato del Análisis de Modos y Fallas Potenciales, el cual, permite identificar desde la función que se realiza/proceso hasta la obtención de resultados identificando las fallas que puedan desviarse de los objetivos planificados. Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón. ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLAS POTENCIALES No. AMEF Página Subsistema Responsable de diseño Preparado por Componente Fecha clave Fecha del AMEF (inicio) ANOS DE MODELO (s) Vehículo (s) Miembros del equipo Item Función Modo de Fallo Potencial Efecto(s) de Fallo Potencial(es) S O C I A Causa(s)/ Mecanismo(s) de la Fallo Potencial O C u l Control de Diseño Actual de Prevención Control de Diseño Actual de Detección D N P N Acciones Recomendadas(s) Responsables y Fechas Objetivo de Cumplimiento Resultados de las Acciones Acciones Tomadas S O C I A P
7.4 Comunicación	Tarjetas Kanban	Funcionan como un sistema de información que permite controlar los procesos mediante señales. En este punto puede mejorar la eficiencia y la transparencia en la comunicación relacionada con la calidad.	Las tarjetas Kanban son de distintos tipos, el formato que se presenta es un ejemplo, mismo cuenta con el requerimiento de piezas para el ensamble de un LEGO y que facilita la comunicación de los requerimientos. KANBAN PRODUCCIÓN 1 de 10 Fecha: 26 de octubre de 2023 PRODUCTO: CC Carro Complejo Dpto. Fuente: Almacén Descripción del Proceso: Ensamble de Carro Complejo Actividad: 1 Aspecto: Actividad: 2 Aspecto: Código Pieza: 1a1-1ba Cantidad: 2 Código Pieza: 2e Cantidad: 2 Actividad: 3 Aspecto: Actividad: 4 Aspecto: Código Pieza: 1ba Cantidad: 1 Código Pieza: 1a1 Cantidad: 1 Actividad: 5 Aspecto: Actividad: 6 Aspecto: Código Pieza: 2e Cantidad: 2 Código Pieza: 2v Cantidad: 2 Actividad: 7 Aspecto: Actividad: 8 Aspecto: Código Pieza: 2a1 Cantidad: 2 Código Pieza: 1y-2x Cantidad: 3

9. Evaluación KPI'S del desempeño

Muestra cómo la organización progresa hacia sus objetivos; estos indicadores permiten medir el rendimiento y la eficacia del sistema en cumplir con los objetivos de calidad.

INDICADORES CLAVE DE DESEMPEÑO									
Datos de identificación									
Nombre					Unidad de medida				
Dimensión					Frecuencia de medición				
Puntaje									
Método de cálculo									
Características del KPI									
Claridad	Relevancia	Economía			Precisión	Aporte marginal			
Nombre del responsable					Capacidad de ser monitorizado				
Justificación de las características del indicador									
Capacidad de ser monitorizado									
Línea base					Tendencia del indicador hacia la meta				
Valor					Meta				
Fecha					Parámetros de semaforización				
Características de las variables utilizadas para cálculo									
Nombre					Descripción de la variable				
Fuentes de verificación					Unidad de medida				
Cómo se obtuvo la información					Frecuencia				
					Fecha en que estuvo disponible la información				
Referencias adicionales									

de costos, tiempos de ciclo más cortos, una mayor flexibilidad operativa, prevenir errores, entre otros. Teniendo en cuenta las herramientas de manufactura esbelta que se seleccionaron, las cuales pueden ser aplicables en algunas cláusulas de la norma, se considera la posibilidad de poder ampliar la selección de dichas herramientas, para así poder cubrir en su totalidad cada uno de los puntos de la norma. Es por ello por lo que, la aplicación conjunta de la norma ISO/IATF 16949 y las herramientas de manufactura esbelta ofrece un enfoque integral para la excelencia operativa en la industria automotriz, permitiendo a las organizaciones mejorar su competitividad, satisfacer las expectativas del cliente y mantenerse a la vanguardia en un mercado altamente demandante.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORES Y COLABORADORES

Marcela Palacios: Conceptualización, Metodología, Redacción. **Juan Francisco Mosiño:** Formulación inicial del proyecto, Revisión Final. **Paola Abigail Escobedo:** Edición, evaluación y revisión Investigación. **Ana Rosa Reyes:** Preparación de borrador original, Investigación.

REFERENCIAS

- [1] Á. A. F. Baltazar, M. B. B. Rodríguez, A. H. Hernández, I. E. L. Navarro, y J. M. Z. Pérez, “Manual para la aplicación de la norma IATF 16949-2016 en departamentos de producción y mantenimiento,” EDUCATECONCIENCIA, vol. 29, no. 33, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.58299/gv9d9z41> [Accedido: 14-may-2025].
- [2] L. B. Baltazar-Jiménez, M. C. Parrales, y M. A. G. González, “Impacto de la gestión de calidad en la productividad, una perspectiva desde la norma IATF-16949,” Administración y Organizaciones, vol. 26, no. 50, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.24275/uam/xoc/desh/rayo/2023v26n50/Baltazar> [Accedido: 14-may-2025].
- [3] ESGinnova group, “Ciclo PHVA en ISO 9001,” 5 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.nueva-iso-9001-2015.com/2022/07/ciclo-phva-en-iso-9001/> [Accedido: 14-may-2025].
- [4] IATF 16949, 1 de octubre de 2016.
- [5] IATF 16949, “Calidad IATF 16949 en Layana,” 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.layana.com/es/quality/iatf16949> [Accedido: 14-may-2025].
- [6] S. Perales-Andreu, Implantación de un Sistema de Gestión de Calidad basada en la normativa IATF 16949:2016, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10953.1/14827> [Accedido: 14-may-2025].

Análisis de la cadena de suministro en la industria automotriz: Estrategias para mejorar la eficiencia y reducir costos

Supply Chain Analysis in the Automotive Industry: Strategies to Improve Efficiency and Reduce Costs

Flores-Plascencia, GM¹, Pulido-Ruiz, FD¹, Delgado-Franco, EG¹, Palacios-Ortega, M¹, Rojas-Mancera, E¹.
(*giovanaplascencia@gmail.com)

Recibido: 10-06-2025 Aceptado: 03-09-2025

RESUMEN

La industria automotriz, una de las más complejas y globalizadas del mundo, depende en gran medida del funcionamiento eficiente de su cadena de suministro (CS). Cualquier interrupción en procesos clave como el abastecimiento de componentes, la distribución, el transporte o la entrega puntual puede generar consecuencias críticas, por ello es de suma importancia implementar técnicas que incrementen la eficiencia operativa y reduzcan costos asociados. En este artículo se lleva a cabo una investigación cualitativa que tiene el objetivo de identificar los factores relevantes que afectan el desempeño de las CS de la industria automotriz, así como proponer estrategias para mejorar la eficiencia en la cadena y reducir costos utilizando herramientas de ingeniería. La metodología empleada se centra en el ciclo de mejora continua e incluye actividades como el

mapeo de la cadena de abastecimiento para detectar factores críticos. A partir de este análisis, se plantea la implementación de estrategias como el ciclo PHVA (Deming), clasificación y análisis de la demanda, pronósticos basados en los pedidos de los clientes, control del lead time y especificaciones, evaluación de proveedores y una gestión eficiente del material para la producción.

Se espera que los resultados permitan identificar áreas de oportunidad dentro de la CS y determinar la factibilidad de implementar las estrategias que se proponen, para poder lograr la mejor eficiencia a lo largo de las actividades involucradas en la SCM (Supply Chain Management).

Palabras clave: Cadena de suministro, industria automotriz, implementación de estrategias.

¹ Tecnológico Nacional de México/ITS de Purísima del Rincón



ABSTRACT

The automotive industry, one of the most complex and globalized in the world, relies heavily on the efficient operation of its supply chain (SC). Any disruption in key processes such as component sourcing, distribution, transportation, or on-time delivery can lead to critical consequences. Therefore, it is essential to implement techniques that enhance operational efficiency and reduce associated costs.

This article presents a qualitative study aimed at identifying the key factors that affect the performance of SCs in the automotive industry, as well as proposing strategies to improve supply chain efficiency and cost reduction by applying engineering tools.

The methodology is based on the continuous improvement cycle and includes activities such

as supply chain mapping to detect critical factors. Based on this analysis, the study proposes the implementation of strategies such as the PDCA (Deming) cycle, demand classification and analysis, customer order-based forecasting, lead time and specification control, supplier evaluation, and efficient material management for production.

The expected outcomes aim to identify areas of opportunity within the SC and assess the feasibility of implementing the proposed strategies, to achieve optimal efficiency throughout the activities involved in Supply Chain Management (SCM).

Keywords: Supply chain, automotive industry, strategy implementation.

INTRODUCCIÓN

En este artículo de investigación se busca analizar la cadena de suministro en la industria automotriz, ya que es un elemento crucial que involucra la gestión y coordinación de diversas operaciones que se encargan del flujo eficiente de materiales, componentes y productos acabados, desde proveedores hasta los clientes finales. Este análisis de la cadena de suministro se considera importante para poder identificar oportunidades de mejora en términos de eficiencia operativa y reducción de costos, la principal problemática a la que se enfrentan las empresas del sector automotriz es que además de que la cadena es compleja, la falla de los suministros afectan la productividad de la línea de producción además de que se afecta la reputación con sus clientes, de ahí que la aplicación de estrategias analíticas en este ámbito resulta ser muy útiles para la industria automotriz ya que pueden optimizar sus procesos, minimizar tiempos de entrega, gestionar de manera efectiva los inventarios y fortalecer relaciones con proveedores clave, lo que beneficia en tener ventaja competitiva significativa en el mercado. En la industria automotriz, varios aspectos son cruciales, algunos tienen más importancia que otros, surge la importancia de identificar aquellos que son determinantes para la competitividad de la empresa, por ejemplo: la calidad del producto es fundamental para mantener la satisfacción del cliente y la reputación de la marca, también el aplicar innovación tecnológica brinda un gran apoyo en ofrecer un mejor producto, manteniendo a la empresa en un rango competitivo y por último el lograr una eficiencia operativa que

aporte a la empresa una mayor utilidad, ya que se reducen costos y mejora la productividad, por medio de la optimización de los procesos y la cadena de suministro y logística.

ESTADO DEL ARTE

Se propone un estudio, que plantea estrategias esenciales para gestionar la sostenibilidad en las cadenas de suministro. Como resultado, se presenta una matriz de enfoques sostenibles y un procedimiento para priorizar dichas estrategias, dirigida a investigadores, académicos y empresarios. La eficiencia en las cadenas de suministro (CS) implica reducir costos, generar valor, aumentar la rentabilidad y contribuir a su sostenibilidad. Esta se logra al cumplir objetivos con el mínimo de recursos y tiempo, lo cual demanda una gestión financiera sólida. Evaluar la eficiencia de la CS requiere considerar tanto los costos logísticos como las razones financieras [1].

Se presenta un estudio cualitativo, sustentado en una revisión de la literatura, el cual examina las principales estrategias para la gestión de cadenas de suministro en un contexto global. Se destacan cinco líneas estratégicas fundamentales: adopción tecnológica, cooperación entre organizaciones, enfoque sostenible, administración de riesgos y aprovechamiento de oportunidades internacionales. La implementación de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT) y blockchain permite incrementar la eficiencia y la visibilidad en las operaciones. A su vez, la colaboración con aliados estratégicos favorece una mejor utilización de recursos [2].

La gestión de inventarios es clave en la cadena de suministro por su impacto en la reducción de costos y la satisfacción del cliente. Se presenta un estudio apoyado por la inteligencia artificial (IA) que, mediante algoritmos de aprendizaje automático, permite predecir la demanda con precisión, optimizar niveles de inventario y mejorar la eficiencia operativa. Además, la IA detecta cuellos de botella y propone mejoras logísticas, fortaleciendo la posición competitiva de las empresas al adaptar sus procesos a las dinámicas del mercado [3].

Se presenta un estudio que analiza el uso de herramientas de manufactura esbelta como estrategia para mitigar riesgos de operación en la cadena de suministro del aguacate en Colombia. A través del mapeo de la cadena de valor, se identifican los riesgos clave y se priorizan mediante el Análisis Modal de Efectos y Fallas (AMFE), el Despliegue de la Función de Calidad (QFD) y la lógica difusa. Estos riesgos se asocian con las mudas del sistema Lean para proponer acciones correctivas mediante herramientas esbeltas. Los resultados evidencian que metodologías como las 5S, el Mantenimiento Productivo Total (TPM), el trabajo estandarizado y la gestión visual son eficaces para reducir riesgos en los distintos eslabones de la cadena [4].

MARCO TEÓRICO

Cadena de suministro

La cadena de suministro comprende todos los procesos, las actividades y los recursos, directos e indirectos necesarios para satisfacer las especificaciones de los clientes. La cadena de suministro integra no solo a la fabricación del producto y los proveedores, sino también a procesos relacionados con inventarios, rutas de distribución, centros de distribución, ventas o marketing e incluso al cliente final.

Toda cadena de suministro presenta dinamismo, es decir, hay un flujo constante de información, de productos, de servicios, de fondos y de conocimiento entre las diferentes etapas para elaboración y distribución de un producto. Estos flujos fundamentales normalmente suceden de manera bidireccional, es decir, hay retroalimentaciones relacionadas a la venta del producto.

El modelo generalizado de la cadena de suministro es representado con un diagrama en donde existe una relación entre las empresas implicadas en la entidad competitiva. Son varias las etapas que incluye la cadena de suministro de manera generalizada, se pueden incluir etapas como: proveedores de materia prima, fabricantes, mayorista y/o distribuidores, minoristas y clientes.

Los clientes son parte fundamental e integral de las cadenas de suministro ya que el conjunto de actividades y procesos de la cadena de suministro busca satisfacer las necesidades y especificaciones de los clientes en cada etapa de la cadena.

El objetivo de una cadena de suministro se encuentra en elevar el valor total generado, es decir, maximizar las ganancias. El valor total generado en una cadena de suministro se obtiene de la diferencia entre el costo final del producto (lo que el cliente paga por el producto) y los costos involucrados en la cadena para realizar y cumplir el pedido [5].

Logística

La logística se basa principalmente en diversas actividades como la coordinación, almacenamiento, transporte y distribución de productos. Se considera fuera de la producción primaria del producto, pero es igualmente importante porque su objetivo principal es hacer funcionar las distintas partes del proceso. De esta forma, es responsable de cumplir a tiempo los objetivos de entrega.

Logística de suministro: Su función es garantizar que la empresa reciba en tiempo suficiente los materiales necesarios para la producción. Es una forma de logística que permite elegir proveedores, controlar los plazos de entrega, gestionar el inventario, analizar todas las necesidades de producción de la empresa y estudiar diversas tendencias.

Logística de almacén: También conocida como intralogística, su función es procesar los materiales que ingresan a la empresa para que queden correctamente almacenados y registrados conforme a ley. Además es responsable de actualizar el inventario, registrar las ubicaciones de almacenamiento de

productos, planificar las ubicaciones de almacenamiento según el tipo de producto e instruir los métodos de transporte.

Logística de producción: Se encarga de que la materia prima y los insumos pasen de un proceso a otro hasta concluir con la elaboración final del producto, cuidando aspectos como el del cumplimiento de estándares de calidad y especificaciones de los clientes.

Logística de distribución: Encargada de transportar el producto final hasta el destino elegido. Este tipo de logística también tiene la funcionalidad de verificar el tipo y tamaño del paquete, monitorear y analizar el transporte de los productos enviados y verificar las áreas donde se distribuirán los productos.

Logística inversa: Este tipo de logística es en realidad la contraria al tipo anterior, por lo que se encarga de manejar los residuos enviados por error, que pueden ser o no reciclables. Además de garantizar que las devoluciones de los clientes se almacenen adecuadamente, también debe asegurarse de que se reutilicen, reciclen y eliminen adecuadamente.

Las principales características de una buena logística son:

Procesamiento de pedidos: El proceso que incluye todo lo relacionado con una compra.

Manejo de materiales: Métodos de transporte interno que trasladan materiales a un almacén o punto de venta.

Embalaje: El proceso de preparar adecuadamente un producto o componente para su transporte seguro.

Transporte de mercancías: flotas (aéreas, terrestres, marítimas, etc.) que pueden utilizarse para transportar productos o materias primas.

Almacenamiento: Optimización del espacio y secuenciación para almacenar eficientemente materias primas o productos.

Control de inventario: asegurar un inventario correcto y optimizado.

Servicio al cliente: Servicios prestados a los clientes para la recepción de pedidos.

Servicio postventa.

Los costos logísticos se refieren a la suma de todos los costos ocultos asociados a las diversas actividades relacionadas con el almacenamiento y transporte de las mercancías desde el inicio del viaje hasta el fabricante para que finalmente lleguen al comprador final. Es la suma de los costos incurridos en la cadena de valor. Esto también se aplica a la eficiencia y eficacia de los procesos logísticos e incluye una serie de costos estrechamente relacionados con el almacenamiento, transporte, mantenimiento, almacenamiento, costos de personal y distribución de todos los productos terminados [6].

Ciclo Deming

El ciclo Deming (PDCA, por sus siglas en inglés) ayuda a ejecutar los procesos de manera estructurada y a comprender la necesidad de brindar altos estándares de calidad ya sea en el producto o servicio. El

ciclo PHVA una herramienta planteada inicialmente por Walter A. Shewhart y trabajada por Edwards Deming en 1950; está fundamentada por cuatro pasos: planificar, hacer, verificar y actuar.

La planificación define las políticas, objetivos y procesos necesarios para lograr resultados organizacionales, con énfasis en qué hacer y cómo hacerlo. El hacer promueve la implementación de procesos acorde a todo lo planificado. En la etapa de verificar se monitorean tanto los procesos, productos y servicios y se toman acciones para garantizar que se logren las actividades planificadas. Finalmente, en actuar, se toman medidas para mejorar continuamente el desempeño del proceso y determinar nuevas limitaciones para mejorar la próxima vez.

El desarrollo del ciclo PHVA comienza con la planeación que establece los objetivos y métodos para alcanzarlos y presenta los indicadores para asegurar su cumplimiento. Posteriormente la empresa desarrolla todas las actividades planificadas y desarrolla, implementa y trabaja de acuerdo con la estrategia del plan estratégico, operativo y táctico de la calidad. Verificar la calidad de los productos y la realización de todos los procedimientos principales de acuerdo con los requisitos de la ley, los clientes y las normas técnicas, para así evaluar la eficiencia. Luego con base en los resultados se consideran estrategias para mantener o mejorar el desempeño, se desarrollan e implementan mejoras, se eliminan las no conformidades y se determinan acciones correctivas, preventivas y de mejora.

El cambio continúa ajustando las pautas y objetivos de calidad e implementando nuevos planes para garantizar que los procesos estén en línea según los acontecimientos del entorno [7].

Lead Time

El lead time (LT), se refiere al tiempo total necesario desde que se realiza un pedido hasta que la mercancía llega al cliente [8]. El manejo de este concepto es fundamental para la organización de todos los procesos a lo largo de toda la cadena de suministro.

El lead time, dependiendo del contexto en el que se utilice, puede variar ligeramente. Este concepto puede dividirse en áreas para comprender cómo afecta a cada una:

Ventas: Conocer el LT con precisión permitirá comprometerse o fijar una fecha de entrega con los clientes.

Compras: El control del LT de los proveedores de materias primas es indispensable para controlar que no existan faltantes de insumos en las líneas de producción, así como para mantener el flujo de las operaciones.

Producción: El lead time de los procesos manufactureros facilita el cálculo de los tiempos de fabricación y esto luego tendrá impacto en la gestión logística y comercial.

Logística y distribución: El lead time logístico cobra una dimensión integral, necesitas conocer el tiempo de suministro del resto de áreas para poder saber cuánto va a tardar producción en fabricarlos, cuándo van a llegar al almacén y en cuánto tiempo se pueden tramitar y entregar al cliente.

Para calcular el Lead Time es necesario calcular el tiempo de procesamiento y el tiempo de espera, como se muestra en la Ec. (1).

$$LT = TP + TE \quad (1)$$

Donde: LT es el Lead Time, TP es el Tiempo de Procesamiento y TE es el Tiempo de Espera.

El resultado de la suma de la Ec. (1) muestra el total de días desde que se realizó el pedido hasta que este llegó al cliente. Se mide en días de calendario para simplificarlo. Este cálculo debe realizarse atendiendo a cada área de la cadena de suministro que se ha identificado anteriormente y por cada producto en particular.

Las ventajas de contar con unos tiempos de suministro reducidos se reflejan en [8]:

Una planificación de la demanda más precisa.

La posibilidad de contar con niveles de stock reducidos.

Una mejora global en el servicio ofrecido al cliente.

METODOLOGÍA

Materiales y métodos

Con el objetivo de contribuir a la mejora continua de la cadena de suministro (CS), se propone la implementación de la metodología PHVA, representada en la Figura 1. Esta metodología, compuesta por cuatro etapas interrelacionadas y de fácil comprensión, es respaldada por las normas de calidad ISO 9001:2015 [9] e IATF 16949:2016 [10]. En el presente proyecto, en cada fase del ciclo se describen las actividades que conforman cada etapa, facilitando su aplicación sistemática en los procesos de la CS.



FIGURA 1: Metodología del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

Desarrollo de la metodología

Etapa 1: Planear

Se recolecta información referente al sector automotriz por medio de la investigación del estado del arte, para conocer las características generales de la industria y así identificar las fases de la CS, a la vez se identifican los factores clave en la industria automotriz.

Etapa 2: Hacer

En esta etapa se realiza el mapeo de la cadena de suministro desde el origen de la materia prima hasta la entrega del producto al cliente esto permite visualizar de manera esquemática los eslabones que la componen. La [Figura 2](#) presenta un modelo genérico que representa los pasos esenciales de la cadena de suministro en la industria en general.

Una vez identificada la CS, el paso siguiente es identificar los factores relevantes en la industria automotriz, uno de estos factores es contar con un equipo multidisciplinario, por ejemplo, regularmente ese equipo se conforma por tres áreas, los cuales son logística, comercio exterior y compras. El equipo de logística se encarga de planear que cantidades de materia prima y cada cuando se deben de estar colocando los pedidos, de acuerdo con la planeación de la producción que va alineada con las solicitudes del cliente [11]. El equipo de compras se encarga de llevar todas las negociaciones comerciales con el proveedor y adicionalmente verificar que cumplan con los estándares requeridos, por ejemplo, certificaciones, calidad, etc. Cuando son nuevos proyectos, el equipo de compras funciona como coordinador y mediador de todas las actividades necesarias para iniciar el proyecto en masa. El equipo de comercio exterior se encarga que todos los materiales importados lleguen al país de la forma más rápida y eficiente, son especialistas que están al tanto de todas las regulaciones impuestas por el gobierno, con el fin de evitar pérdidas de material y posibles problemas con el gobierno u otras organizaciones.

Los factores más importantes de acuerdo con la investigación realizada que se deben tomar en cuenta son: Regulaciones del país de donde se está comprando el material, regulaciones del país a donde se está

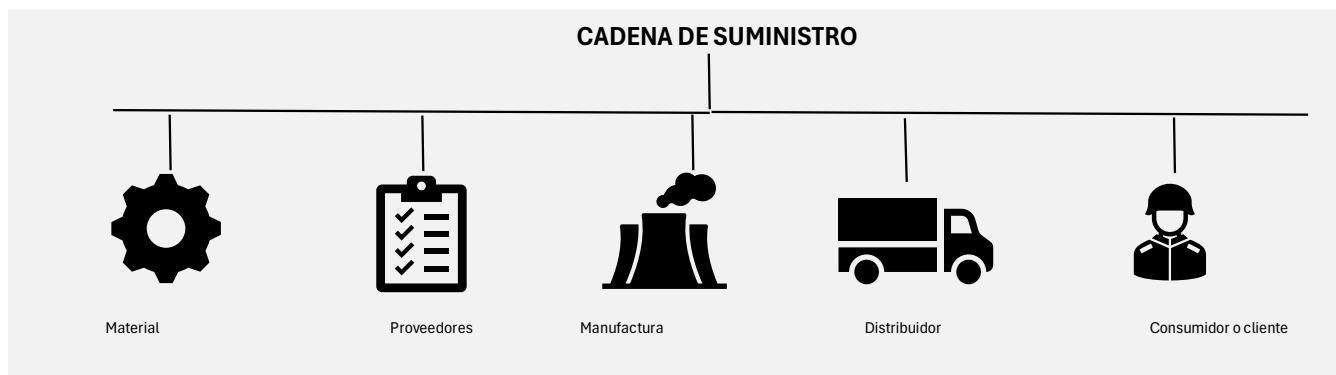


FIGURA 2: Mapeo genérico de la CS. Fuente: Elaboración propia.

importando y regulaciones de país de a donde se envía como producto terminado; certificaciones exigidas por el proveedor, la posibilidad de conflictos internacionales, tratados de libre comercio, lead time, capacidad financiera del proveedor, capacidad de producción del proveedor, socios comerciales estratégicos para la cuestión de envíos internacionales, código de ética del proveedor, certificaciones, capacidad para resolución de problemas y cumplimiento con las normas de calidad, costos de operación, términos y condiciones de contrato con el proveedor, si el cliente cuenta con una lista de subproveedores recomendados, elegir todos los posibles de la lista, evaluación continua de los proveedores y seguimiento a posibles contramedidas, auditorías periódicas a proveedores.

Evaluación a proveedores

El departamento de compras debe encargarse de coordinar una evaluación periódica a los proveedores, funciona de la siguiente manera: se establecen criterios de evaluación para cada una de las áreas que estarán evaluando (logística, compras, calidad, proyectos, etc.). Una vez que se compra, se deben recolectar todas las calificaciones asignadas por cada uno de los departamentos y calcular la calificación final dependiendo del peso porcentual que se le dé a cada uno de los criterios.

Se debe de establecer un proceso para ciertos rangos de calificaciones, por ejemplo: Calificaciones de 80 a 100, el resultado será A, calificaciones de 70 a 80 el resultado será B y calificaciones menores a 70 el resultado será C, la [Figura 3](#) muestra las ponderaciones de las calificaciones.



FIGURA 3: *Criterios de clasificación para proveedores. Fuente: elaboración propia.*

Para los proveedores con resultado A, se les comunica el resultado y se les agradece el compromiso a la atención que brinda a los clientes.

Para los proveedores con resultado B, se les comunica el resultado junto con evidencias de las áreas de oportunidad, posterior a esto se les pide establecer y cumplir contramedidas para mejorar su rendimiento como proveedor, estos proveedores están forzados a obtener el resultado A en la siguiente evaluación, de lo contrario caerán a la clasificación C.

Para los proveedores con resultado C, se les bloquea para nuevos proyectos, se les comunican los resultados junto con evidencias de su área de oportunidad, se les realiza una auditoría presencial en la cual se revisan todas las áreas y se les solicita contramedidas a las no conformidades. Posteriormente se realiza una segunda auditoría para verificar que las contramedidas hayan sido implementadas y que sus

áreas de oportunidad ahora se consideren fortalezas, en el caso de que el proveedor no apruebe la auditoria, inmediatamente se inicia el plan para cambio de proveedor.

Realizando evaluaciones periódicas se asegura que los proveedores trabajen de acuerdo con los estándares solicitados y se minimizan riesgos posibles causados por fallas del proveedor.

Clasificación de la demanda y pronóstico de ventas

El uso de pronósticos de ventas es necesario para la buena administración de cualquier empresa, a lo largo de la historia moderna de la administración de recursos se confirma que un buen desarrollo en los pronósticos conlleva a una mejor administración de los recursos disponibles. Como se menciona, el uso de pronósticos de la demanda es necesario para una buena administración de cualquier empresa, ya que la planeación y control de las actividades logísticas requieren estimaciones precisas de los volúmenes de productos y servicios que serán manejados, estas estimaciones se realizan con pronósticos y estos a su vez son generados en varios departamentos, como son mercadotecnia, planeación de la producción, logística u otros. Con los pronósticos se puede generar información útil para el departamento de finanzas, para presupuestos, créditos, etc.; para el departamento de producción, para capacidad por línea, maquinaria, mano de obra, procesos o métodos, etc.; para el departamento de logística, para localización y capacidad de plantas, almacenes y centros de distribución, determinar sistemas de distribución, planeación de inventarios, requerimientos de materia prima, necesidades de transporte, etc. Por lo tanto, es de suma importancia entender la relación entre los pronósticos y las decisiones que se deben tomar en la administración de recursos; sin un pronóstico de ventas no podría haber planeación de las necesidades de producción como son capacidad y mano de obra.

Para manejar de una manera más efectiva la demanda y los pronósticos que se determinan de las especificaciones de los clientes, se propone realizar una clasificación de clientes, en la cual se puede organizar, por ejemplo: la cantidad de producto que solicitan, por el periodo en el que requiere el producto, por producto más solicitado, entre otras. Obteniendo así un orden de información para llevar un mejor control en la [Figura 4](#) se propone una clasificación tomando en cuenta los criterios mencionados.

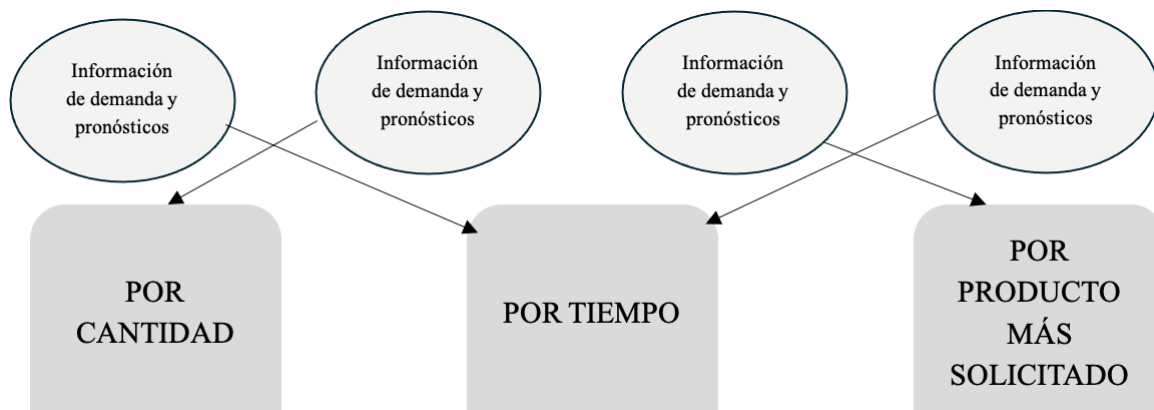


FIGURA 4: *Clasificación de la demanda y pronósticos de ventas. Fuente: Elaboración propia.*

Etapa 3: Verificar

En la etapa de verificar, se definen los indicadores de desempeño clave de las cadenas de suministro en el sector automotriz. En la [Tabla 1](#) se resumen los indicadores más relevantes que aportan información importante en cuanto a la medición de las cadenas de suministro.

Tabla 1: Indicadores de desempeño en la CS.

Indicador	Qué mide	Fórmula
Eficiencia	El nivel de rendimiento de los recursos.	$E = \frac{\text{Salidas}}{\text{Entradas}} * 100$
Nivel de servicio al cliente	El porcentaje del pedido entregado con relación al total ordenado por el cliente.	$\frac{\text{Total de pedidos futuros}}{\text{Número de pedidos solicitados por cliente}}$
Tiempo de respuesta	El tiempo desde que se realiza el pedido hasta que se entrega al cliente.	$\sum \text{de los tiempos}$
Rotación de inventario	Inversión del inventario en relación con el costo de los bienes que se suministran en toda la cadena.	$\frac{\text{Costo de los bienes vendidos}}{\text{Valor promedio del inventario agregado}}$

El costo de los bienes vendidos se refiere al costo anual que una compañía tiene que absorber para producir bienes y servicios, no incluye gastos de ventas ni gastos administrativos.

El valor promedio del inventario agregado es el valor de todos los artículos mantenidos en inventario en base a su costo [\[12\]](#).

Etapa 4: Actuar

Implementación del Ciclo Deming

En la etapa cuatro de la metodología, se sugiere implementar el ciclo de mejora continua PHVA, para poder realizar esta actividad se sugiere consultar las normativas de calidad ISO [\[9\]](#) y [\[10\]](#). De manera general el ciclo se divide en cuatro etapas interrelacionadas que consisten en:

- Planificar: Que la empresa del sector automotriz identifique los problemas, áreas de oportunidad o actividades que necesitan mejora, establecer objetivos claros, definir herramientas a utilizar e indicadores de control.
- Hacer: En esta etapa se implementa lo planeado de la etapa anterior, se puede implementar pruebas piloto o simulación, corrección a la planeación y formación del personal y maquinaria necesaria, para poder lograr los objetivos organizacionales.

c) Verificar: En esta etapa se realiza un control y análisis para verificar que las mejoras implementadas hayan alcanzado los objetivos establecidos, se puede utilizar herramientas estadísticas para verificar que se cumpla con los estándares de calidad establecidos.

d) Actuar: En esta última etapa se ajusta el plan de mejora de acuerdo con los resultados obtenidos. Si se han logrado los objetivos, se implementan las soluciones de forma definitiva. En caso contrario, se examina para identificar errores y comenzar de nuevo un Ciclo Deming.

El ciclo de la [Figura 5](#) se puede implementar en cada área que conforma la cadena de suministros para así lograr una mejora continua en cada eslabón de la CS.

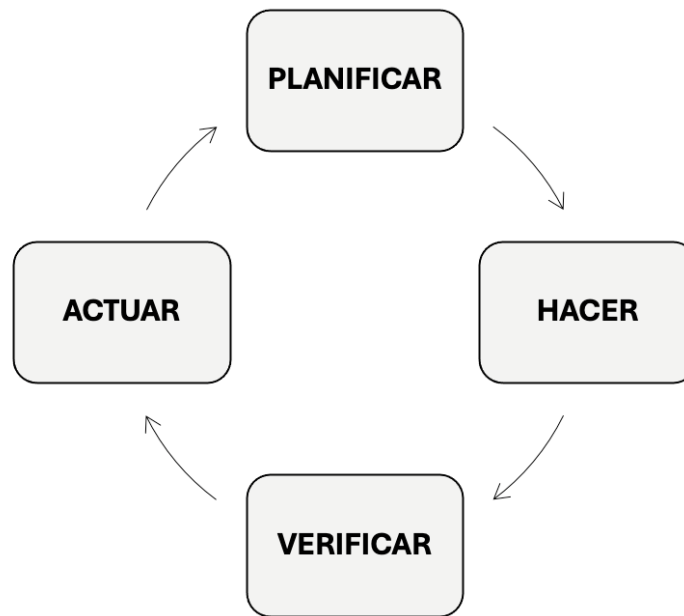


FIGURA 5: Esquema del ciclo Deming. Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Con base en el estudio del estado del arte y la consulta de la bibliografía se logró analizar las cadenas de abastecimiento para proponer un esquema general de una CS que simplifica las etapas que conforman los procesos de la industria automotriz ([Figura 2](#)). Este esquema permite visualizar a los involucrados, el flujo de información y el flujo de producto a través de la cadena. La aportación de esta investigación radica en que las empresas puedan identificar las distintas etapas de su cadena de abastecimiento, permitiendo detectar cuellos de botella, fallas en los tiempos de entrega de sus proveedores (LT), así como tomar decisiones estratégicas que van desde el seguimiento y el trabajo conjunto con la proveeduría para mantener la calidad de los insumos y de esta forma garantizar la calidad de los productos.

La investigación permitió identificar los factores clave que influyen en el desempeño de las cadenas de suministro. Asimismo, se determinaron las principales estrategias que contribuyen a mejorar la eficiencia y reducir costos, entre las que destacan: la evaluación de proveedores, la clasificación y

pronóstico de la demanda, el uso de indicadores de desempeño, entre otras. La aplicación de estas estrategias facilitará una toma de decisiones más informada, oportuna y orientada a la mejora continua.

Se realizó un estudio para identificar los indicadores indispensables en medición del desempeño de la cadena de suministros en general, como se plasmó en la [Tabla 1](#).

Como estrategia de mejora se sugiere la implementación del ciclo Deming, ya que esta metodología es entendible y fácil de utilizar y ha demostrado mejorar los procesos donde se implemente, como se mostró en la [Figura 5](#).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis de la cadena de suministro permite visualizar información antes de la toma de decisiones, con la finalidad de optimizar los procesos, simplificar y eliminar pasos innecesarios en las cadenas. Este análisis sugiere adoptar indicadores que darán paso a la mejora continua de los procesos involucrados en las cadenas de suministros, así como visualizar riesgos potenciales que pueden tener efecto negativo en el desempeño de esta.

Es deseable que se aplique este análisis a una empresa específica del sector automotriz, enfocándose en estudios de redes de distribución para optimizar los costos generados por el transporte, almacenaje, trámites aduaneros y en general los costos asociados a la logística de mercancías. Se sugiere tomar en cuenta los factores mencionados a lo largo del proyecto ya que son los más comunes y los que se presentan con mayor frecuencia en cadenas complejas.

Es recomendable estudiar casos de éxito o fracaso en empresas del ramo automotriz para comprender cómo se aplican los principios de logística y de SCM en la práctica.

DECLARACIÓN Y CONTRIBUCIÓN DE AUTORES Y COLABORADORES

Giovana Michelle Flores Plascencia: Redacción, Ideas de estrategias, Análisis. **Frida Desiree Pulido Ruiz:** Investigación, Metodología. **Estefanía de Guadalupe Delgado Franco:** Correcciones de citado. **Marcela Palacios Ortega:** Supervisión. **Erick Rojas Mancera:** Edición, Revisión.

REFERENCIAS

- [1] A. Pupo-Pérez, M. Pérez-Campaña, A. Ortiz-Pérez y M. F. Cruz-Pérez, *Formulación de Estrategias Eficaces para la Gestión de la Sostenibilidad de Cadenas de Suministros, Economía y Negocios*, vol. 14, no. 2, pp. 54–73, 2023. <https://doi.org/10.29019/eyn.v14i2.1213>
- [2] S. E. Ruiz-López, *Estrategias de Gestión de la Cadena de Suministro en un Mundo Globalizado, Rev. Científica Zambos*, vol. 3, no. 2, pp. 97–119, 2024. <https://doi.org/10.69484/rcz/v3/n2/19>

- [3] J. S. B. Arroyabe, J. A. R. Guerrero, E. G. Colonia y J. L. P. Lozada, *Estrategias basadas en inteligencia artificial para la gestión de inventarios en la cadena de suministro*, *Tecnol. en Marcha*, vol. 37, no. 2, pp. 88–97, 2024.
- [4] A. M. Paredes-Rodriguez, V. L. Chud-Pantoja y C. C. Peña-Montoya, "Gestión de riesgos operacionales en cadenas de suministro agroalimentarias bajo un enfoque de manufactura esbelta," *Información tecnológica*, vol. 33, no. 1, pp. 245-258, 2022. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642022000100245>
- [5] P. A. C. Portugal, F. C. Álvarez, M. B. G. Tejedor, and B. O. Rodríguez, "La administración de la cadena de suministro y su importancia en las empresas, como parte de la estrategia en los nuevos modelos de negocios," *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 7, no. 3, pp. 7203–7219, 2023. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i3.6709
- [6] A. Castellanos Ramírez, *Logística comercial internacional*. Barranquilla, Colombia: Universidad del Norte, 2021. <https://doi.org/10.2307/j.ctv287sb63>
- [7] M. C. Cano Cruz and V. J. Contreras Acha, *Implementación del Ciclo Deming (PHVA) para mejorar el proceso de compras administrativas de la empresa International Camiones del Perú SA en el año 2023*, Lima, Perú, 2024. <https://hdl.handle.net/11537/40547>
- [8] T. C. Porfirio, V. R. F. Iveli, and G. R. Fabian, "Lead time en la cadena de suministros aplicada en la ruta marítima Asia-México," *ARACÉ*, vol. 6, no. 4, pp. 12646–12658, 2024. <https://doi.org/10.56238/arev6n4-102>
- [9] International Organization for Standardization, *ISO 9001:2015 – Quality management systems – Requirements*. Geneva, Switzerland: ISO, 2015.
- [10] International Automotive Task Force (IATF), *IATF 16949:2016 – Quality management system requirements for automotive production and relevant service parts organizations*. France: IATF, 2016.
- [11] V. M. Pérez Gómez, J. C. Acosta Jiménez, A. Hernandez Salgado, L. D. Martinez Guerra, y L. E. Otero Roman, *Propuesta en Supply Chain Management y Logística en la empresa Esgrim*, informe académico, 2020.
- [12] F. R. Jacobs y R. B. Chase, *Operations and Supply Chain Management*, 17ª ed., Nueva York, NY: McGraw-Hill, 2023

Optimizing primary care networks in Guanajuato: planning and allocation of services

Optimización de las redes de atención primaria en Guanajuato: planificación y asignación de servicios

Park, M. J.¹, Mendoza-Gómez, R.*¹ 
(*rodolfomendoza@tec.mx)

Recibido: 02-09-2025

Aceptado: 26-09-2025

RESUMEN

Garantizar un acceso equitativo a los servicios de atención primaria en salud requiere un diseño estratégico de las redes de prestación de servicios, lo cual comparte desafíos fundamentales con el diseño de redes de cadena de suministro, incluyendo la localización de instalaciones, la asignación de capacidad y la optimización de la cobertura de servicios. Este estudio propone un modelo bi-objetivo de programación entera mixta para optimizar las decisiones de inversión y ubicación de Unidades de Atención Primaria en Salud (PHUs, por sus siglas en inglés) bajo restricciones presupuestarias. El primer objetivo minimiza la distancia total de viaje para consultas médicas esenciales, mientras que el segundo maximiza la cobertura poblacional de servicios complementarios —nutrición, atención dental, salud mental, análisis clínicos e imagenología—, cada uno con radios de cobertura específicos. Diferentes

tipos de PHUs ofrecen capacidades y carteras de servicios variables, lo que introduce compensaciones explícitas entre accesibilidad, disponibilidad de servicios y costo. El modelo se resuelve utilizando el método epsilon-constraint mejorado (AUGMECON2), lo que permite una exploración eficiente de soluciones Pareto-óptimas. Un estudio de caso en Guanajuato, México, que abarca ocho regiones, 46 municipios, 3.44 millones de puntos de demanda, 515 PHUs existentes y 486 sitios candidatos, demuestra la aplicabilidad del modelo utilizando datos oficiales de demanda, capacidades y costos de inversión actualizados. Los resultados muestran que las regiones urbanas logran una cobertura casi universal de servicios complementarios con presupuestos moderados, mientras que las áreas rurales requieren mayores inversiones para cerrar brechas de servicio, lo que resalta la importancia de una planificación sensible al contexto. Al

¹ Tecnológico de Monterrey, School of Engineering and Science, Eugenio Garza Sada SN, Cerro Gordo, León, Guanajuato, México. CP. 37190.



enmarcar la infraestructura sanitaria como una red de servicios en múltiples niveles, el enfoque propuesto ofrece a los tomadores de decisiones una herramienta transparente y basada en datos para evaluar los compromisos entre apertura de instalaciones, expansión de capacidad y cobertura de la demanda. Más allá del sector salud, la metodología es adaptable a

otras redes de servicios públicos que enfrentan recursos limitados y patrones de demanda cambiantes, contribuyendo al campo más amplio del diseño y optimización de redes de suministro.

Palabras clave: modelo bi-objetivo, planeación en salud, localización de instalaciones, atención primaria en salud

ABSTRACT

Ensuring equitable access to primary healthcare services requires strategic design of healthcare delivery networks, which shares fundamental challenges with supply chain network design, including facility location, capacity allocation, and service coverage optimization. This study proposes a bi-objective mixed-integer linear programming model to optimize investment and placement decisions for Primary Healthcare Units (PHUs) under budgetary constraints. The first objective minimizes the total travel distance for essential medical consultations, while the second maximizes population coverage of complementary services—nutrition, dental care, mental health, clinical analysis, and imaging—each with service-specific coverage radii. Different PHU types provide varying capacities and service portfolios, introducing explicit trade-offs between accessibility, service availability, and cost. The model is solved using the improved epsilon-constraint method (AUGMECON2), enabling efficient exploration of Pareto-optimal solutions. A case study in Guanajuato,

Mexico, encompassing eight regions, 46 municipalities, 3.44 million demand points, 515 existing PHUs, and 486 candidate sites, demonstrates the model's applicability using official data on demand, capacities, and updated investment costs. Results reveal that urban regions achieve near-universal complementary-service coverage with moderate budgets, whereas rural areas require higher investments to close service gaps, highlighting the importance of context-sensitive planning. By framing healthcare infrastructure as a multi-tier service supply network, the proposed approach provides decision-makers with a transparent, data-driven tool to evaluate trade-offs between facility opening, capacity expansion, and demand coverage. Beyond healthcare, the methodology is adaptable to other public service networks facing constrained resources and evolving demand patterns, contributing to the broader field of supply chain network design and optimization.

Keywords: bi-objective model, healthcare planning, facility location, primary healthcare services.

INTRODUCTION

Universal access to quality healthcare services is widely recognized as a cornerstone of societal well-being [1]. However, in many developing countries, significant inequalities persist due to uneven resource distribution, limited geographic accessibility, and differences in service quality across healthcare facilities. These systemic gaps, combined with the absence of comprehensive health insurance for large segments of the population, hinder access to essential medical care [2]. In the pursuit of reducing this inequality, institutions have emerged with the important task of attending to individuals without health insurance, providing them access to primary services in situations where economic barriers block access to private services [3]. In the context of Mexico, the Mexican Ministry of Health (Secretaría de Salud, SSA, in Spanish) assumes the most vital role in this commission. As the primary healthcare governmental institution responsible for public health issues, supported by the government's duty to provide essential resources, it manages and supervises the implementation of health policies and initiatives within the country. Its purpose is to provide medical care and preventive services to individuals who could be marginalized from medical attention through its network of Primary Healthcare Units (PHUs) and hospitals [4]. However, the healthcare system in Mexico is complex and comes with its own set of challenges. The current healthcare system in the country reflects the interplay of numerous factors, including how institutions are divided, the limitations on available funds, and the necessity to adjust to the changing needs of the population [5]. In this context, the need for optimizing resource planning and facility positioning emerges as a crucial requirement to ensure that medical care reaches individuals with the greatest need.

In 2020, in the state of Guanajuato, Mexico, the National Institute of Statistics and Geography, (INEGI, *by its acronym in Spanish*) reported that approximately 21% of the population (1.2 million) lack formal health insurance [6]. This data strongly emphasizes the critical importance of addressing these disparities in healthcare access. Therefore, the present study aims to address this challenge through a thorough analysis of the healthcare situation, subsequently presenting an optimization model for the placement of new PHUs. This model incorporates service demand and capacity, providing a comprehensive framework for decision-making. This study proposes a bi-objective mixed-integer linear programming model to improve access to primary healthcare services by optimizing the investment of the PHUs of the SSA. The services provided in these facilities were classified into the main service that corresponds to the basic medical consultation and the complementary services such as nutrition counseling, dental care, mental health, clinical analysis, and imaging. For the primary service, which is available at all PHUs, demand is allocated to capacitated PHUs to minimize the total travel distance from demand points. As for complementary services, which are limited to specific PHUs, the goal is to maximize demand coverage. The problem includes a budget constraint to open new PHUs or upgrade the existing ones to increase the capacity of the main service and the availability of complementary services. This problem is applied to a Case Study based on the State of Guanajuato, Mexico, divided into eight regions. The Pareto set for each region was obtained using the Epsilon-constraint method,

specifically employing an improved version known as the AUGMECON2 methodology [7]. The case study results help measure the potential benefits of using this model in real sceneries.

The field of facility location has grown with a high impact on science in recent decades, especially in the context of healthcare services. A variety of location models have been proposed and tailored to tackle many challenges in the industry and public sectors. A comprehensive compilation of these models has been outlined by [8] and recently [9]. The investigation presented here is closely linked to the healthcare field, which has also seen significant contributions. To achieve a comprehensive understanding of the field, surveys such as those undertaken by [10] and [11] are noteworthy, exploring the diverse domain of healthcare facility localization. However, the roots of this exploration reach back to historical surveys by [12] - [16] which played a key role in deepening the understanding of the intricacies in this field. Furthermore, [17] laid the foundation for contemporary research, presenting an array of multi-objective models and methodologies relevant to facility localization.

The critical task of healthcare facility localization has garnered considerable attention in the research community. The foundational work of [18] addresses the Capacitated Maximal Location Problem (CMLP), maximizing population allocation within coverage radii with capacity limitations. In this lineage, the contributions of [19] and [20] are significant. [21] push the boundaries further, incorporating multiple capacity levels, influencing our approach. A distinct perspective is presented by [22], who contemplates the strategic positioning of drone launch sites for resource distribution. The synergy between location and healthcare has led to new questions. [23] have developed hierarchical models that merge facility localization, allocation, and demand coverage into a unified framework. Simultaneously, authors like [23] - [26] and explore multi-objective and multicriterial models, expanding the range of optimal solutions.

Focusing on Mexican healthcare, a series of studies by [27] offer a comprehensive approach to planning diagnostic services within Mexico's segmented healthcare system, emphasizing cost-effective equipment allocation and patient referrals. In a related context, [28] present a hybrid metaheuristic framework for specialized diagnostic services, delivering cost-effective solutions. [5], [29] and [30] address the critical challenge of optimizing Primary Healthcare unit allocation and minimizing patient travel distances. [31] propose an undisclosed mathematical modeling approach to optimize existing Primary Healthcare Centers, aiding resource allocation and network performance improvement in the face of evolving demographics and limited investments. [32] propose a maximal covering location model with partial coverage and variable radii to optimize the placement of second-level specialized healthcare services in Mexico. [33] explore the efficient deployment of mobile units to enhance healthcare coverage, particularly in low-income areas. These studies provide valuable tools for optimizing healthcare facilities and resource allocation, with potential global applications. However, this study pursues the combination of the Capacitated Facility Location Problem (CFLP) and the Maximal Covering Location Problem (MCLP) to address the localization of primary healthcare centers within the public sector. Our model considers various facility types, each with distinct cost and service implications. Additionally, it proposes

a solution to handle complementary services within facilities with finite capacities. This adaptation builds upon an integration and refinement of established models, providing the potential to generate effective solutions for the complex task of healthcare facility localization within the constraints of limited resources.

The remainder of this paper is organized as follows. Section 2 introduces the problem formulation, describing the bi-objective mixed-integer programming model along with its parameters, decision variables, and constraints. Section 3 presents the solution methodology, detailing the improved epsilon-constraint approach employed to efficiently generate the Pareto frontier. Section 4 describes the case study conducted in the state of Guanajuato, Mexico, including data sources, demand characterization, and network configuration. Section 5 reports the Results and Analysis, discussing trade-offs between accessibility, complementary service coverage, and budget allocation. Finally, Section 6 summarizes the main conclusions and outlines potential directions for future research.

PROBLEM FORMULATION

The following problem is taken up from [5]. However, in this case, the study addresses a bi-objective problem. In the original model, a single objective function was considered while the other was constrained. In the present formulation, two types of services are analyzed. The Main service (MS) corresponds to the outpatient service provided by a physician. The Complementary Services (CS) are other services available in some PHUs such as nutrition counseling, dental care, mental health, clinical analysis, and imaging. Demand for MS must be allocated in the problem to PHUs without exceeding their capacities. In this sense, the objective is to minimize the sum of the travel distance of all the demand. In the case of CS, the objective is to maximize the coverage of demand. To evaluate the coverage, a critical coverage radius is considered for each CS type. In the problem, there are various levels of PHU, as increase the level, additional capacity of the MS and additional CS are available, but the investment cost increases. In the problem is considered the option to upgrade existing PHUs to a higher level but also is considered the option to open new PHUs in candidate site. These decisions are limited by a budget.

For the sake of completeness and a better understanding of the proposed solution method, the integer linear formulation of the problem proposed by [5] is reproduced. The notation, parameters, and variables used in the problem formulation are the following:

Sets:

- M Set of demand points; $i \in M$.
- N Set of existing PHUs and candidate locations to install new PHUs; $j \in N$.
- N_A Subset of locations such that a PHU is already installed.
- N_B Subset of locations such that a new PHU can be installed.

K	Set of PHU types; $k \in K$.
$K(j)$	Subset of PHU types to install or upgrade at location $j \in N$.
S	Set of complementary services; $s \in S$.

Parameters:

F^k	Fixed cost of installing the PHU type $k \in K$.
U_j^k	Fixed cost of upgrading the PHU located at $j \in N_A$ to a PHU type $k \in K$.
B	Available budget for installing or upgrading PHUs.
D_{ij}	Distance from demand point $i \in M$ to the PHU located at $j \in N$.
P_i	Demand (number of people) of the main service and the complementary services at point $i \in M$.
C^k	Capacity (number of people) of the PHU type $k \in K$ for providing the main service.
TTD	Upper bound on the total travel distance by the demand for receiving the main service.
R^s	Critical distance of coverage for the complementary service $s \in S$.
T^{ks}	Auxiliary parameter equal to 1 if the complementary service $s \in S$ is provided by the PHU type $k \in K$; and 0, otherwise. This parameter does not appear in the model, but it is used for computing parameters below A_{ij}^{ks} .
A_{ij}^{ks}	Coverage parameter equal to 1 if a PHU type $k \in K(j)$ located at site $j \in N$ covers the demand point $i \in M$ for the complementary service $s \in S$.

Decision variables:

y_j^k	Binary variable equal to 1 if the PHU type $k \in K(j)$ is located at site $j \in N$ and 0, otherwise.
x_{ij}	Binary variable equal to 1 if the demand point $i \in M$ is allocated to the PHU located at $j \in N$ for the main service; and 0, otherwise. $x_{jj} = 1$ represents a facility located at demand point j .
v_i^s	Binary variable equal to 1 if the service $s \in S$ of the demand point $i \in M$ is covered; and 0, otherwise.

Optimization model:

$$\text{Minimize} \quad Z_1 = \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} P_i D_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{Maximize} \quad Z_2 = \sum_{i \in M} \sum_{s \in S} P_i v_i^s \quad (2)$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{j \in N} x_{ij} = 1 \quad i \in M \quad (3)$$

$$\sum_{i \in M} P_i x_{ij} \leq \sum_{k \in K(j)} C^k y_j^k \quad j \in N \quad (4)$$

$$x_{jj} \geq \sum_{i \in M} y_j^k \quad j \in N \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K(j)} y_j^k \leq 1 \quad j \in N_A \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K(j)} y_j^k = 1 \quad j \in N_B \quad (7)$$

$$v_i^s \leq \sum_{j \in N} \sum_{k \in K(j)} A_{ij}^{ks} y_j^k \quad (8)$$

$$\sum_{j \in N_A} \sum_{k \in K(j)} U_j^k y_j^k + \sum_{j \in N_B} \sum_{k \in K(j)} F^k y_j^k \leq B \quad (9)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad i \in M, j \in N \quad (10)$$

$$y_j^k \in \{0,1\} \quad j \in N, k \in K(j) \quad (11)$$

$$v_i^s \in \{0,1\} \quad i \in M, s \in S \quad (12)$$

The first objective function Eq. (1) aims to minimize the total travel distance of the demand to the PHU for receiving the main service. The second objective function Eq. (2) seeks to maximize the total demand coverage of the complementary services. Constraints Eq. (3) ensure that each demand point is allocated to a single facility for the main service. Constraints Eq. (4) ensure that the total demand allocated to each PHU must not exceed its capacity. Constraints Eq. (5) force to allocate demand to a site where a PHU is located. Constraints Eq. (6) ensure that an existing PHU can be upgraded to another PHU type or can remain its current PHU type. Constraints Eq. (7) allow to open a single PHU type on a candidate site. Constraints Eq. (8) activate the variable v_i^s if a demand point is covered by a complementary service. Constraint Eq. (9) limits the number of PHU to be upgraded and PHUs opened in a candidate's sites according to the budget limit. Finally, the nature of the decision variables is specified by constraints Eq. (10) – Eq. (12)

SOLUTION METHODOLOGY

The previous bi-objective linear integer programming model was solved using the epsilon-constraint methodology for multi-objective optimization. The goal is to find a set of solutions that optimize multiple conflicting objectives simultaneously. This method transforms a multi-objective optimization problem into a series of mono-objective problems by introducing an epsilon parameter and turning one objective into a constraint while optimizing the others. The method found in the Pareto set is the set of solutions in the decision space where no solution is superior to another in all the objectives. These solutions are considered Pareto optimal, as they represent a trade-off between objectives, and there is no way to improve one objective without degrading another.

The AUGMECON method represents an enhancement of the original epsilon-constraint method and is widely recognized for its effectiveness in generating Pareto front representations. In this study, AUGMECON2 [34] was employed, an improvement upon AUGMECON [35] that leverages information from slack variables in each iteration. This enhancement leads to a reduction in computation time by avoiding redundant iterations and optimizing the overall process.

In the introduced problem, the objective function Z_2 was moved to the constraints as is shown in the following model:

$$\text{Minimize} \quad Z_1 - \text{eps} \times \text{Slack} \quad (13)$$

$$\text{Subject to} \quad Z_2 - \text{Slack} = e \quad (14)$$

The new constraint Eq. (14) is equal to a new parameter (e) that represents a minimum bound for the constrained objective function. This parameter is systematically modified to generate different Pareto points. The number of Pareto points increases as the number of different e values are proposed. A new variable (Slack) is created to store the difference between Z_2 and e . Since a higher value of the Slack variable is desirable because it improves the maximization of the covered demand for complementary services, this variable is added to the objective function but is multiplied by a very small value (1×10^{-9}) to not generate conflict with Z_1 . The other constraints of the original model remain equal.

To generate the bound of the new constraint Eq. (14) it is required to find the extreme points of the Pareto set using lexicographic optimization. For the first extreme point, the original model is solved minimizing only Z_1 obtaining as objective value Z_1^+ . Then, the problem is solved by minimizing Z_2 , while adding the following constraint. The objective function value obtained from this problem corresponds to the first extreme point e_1 .

$$Z_1 \geq Z_1^+ \quad (15)$$

The second extreme point is generated similarly, but in this case, Z_2 is firstly minimized and the solution Z_2^+ is included in a new constraint while Z_1 is minimized as follows:

$$Z_1 \leq Z_1^2 \quad (16)$$

With the last problem solved, the second extreme point e_2 is generated. Once the two extreme bounds are generated, $n - 2$ equidistant points are calculated between these two values, to obtain total n Pareto points. In the implementation of this method, some e_t such that $t = 1, 2, \dots, n$ may generate the same Pareto points; therefore, the number of Pareto points is not always n . However, these cases can be omitted to be solved because require unnecessary computing time. To determine if a problem must be solved the following equations are computed:

$$\text{Step} = \frac{e_2 - e_1}{n - 1} \quad (17)$$

$$b = \text{int}(\text{Slack}/\text{Step}) \quad (18)$$

where $\text{int}()$ is the function that returns the integer part of a real number.

CASE STUDY

The addressed bi-objective problem was applied to the case study of the state of Guanajuato, one of the 32 federal entities of Mexico. This territorial unit is divided into 46 municipalities, comparable to counties in the United States, encompassing a total of 12,340 demand points subject to this analysis. Covering an area of 30,606.7 km², the state accounts for approximately 1.6% of Mexico's total landmass, as visually depicted in Figure 1.



FIGURE 1: *A map of the state of Guanajuato along with its demand points.*

The dataset used in this study is available at Mendeley Data. Demand points and population data were obtained from the 2020 Population and Housing Census published by INEGI [6], considering two geographical levels: locality (ITER) and Basic Geo-statistical Area (AGEB). Using the geographic coordinates of each locality, a Euclidean distance matrix was constructed to estimate travel distances between demand points and healthcare facilities [6]. Information on existing PHUs—including their locations, types, and capacities—was collected from the Directorate General of Health Information of the Mexican Ministry of Health [36]. Installation and upgrade costs for PHUs were obtained from the “Resource Models for Planning Health Units” report [37], with values updated to reflect recent economic conditions. These integrated datasets provided the necessary inputs for modeling demand distribution, facility capacities, costs, and distances within the healthcare network.

As depicted in Figure 2, the state is divided into eight regions. The territorial division plays a crucial role in this study, providing the necessary framework for analyzing regional patterns and evaluating the model's impact in various specific geographical areas. Due to the complexity of the problem, solving it

for the entire state of Guanajuato in a single instance is not feasible. Therefore, the decision was made to address the issue regionally. This territorial structure facilitates data collection and analysis, allowing for a deeper understanding of local and regional dynamics. Furthermore, the territorial subdivision is considered essential for the effective administration of policies and services, with its understanding being vital to address specific challenges and facilitate equitable development.

In that context, [Table 1](#) provides a comprehensive overview of demand points, demand quantity, existing PHUs in each region, their capacities for the main service, current utilization rates, and potential candidate sites for PHU installations. Capacity is determined by considering the type of PHU multiplied by the 'basic kernel,' equivalent to the capacity to serve 3,000 inhabitants, a crucial parameter in the analysis. For instance, when examining Region 1, it becomes evident that its capacity to provide primary medical services, specifically medical care, significantly surpasses the current demand. This results in a utilization rate of only 55% of its total capacity, indicating a substantial margin for accommodating more patients, as can be observed in column number 6. Conversely, in contrast, in region 6, the situation is inverted. The demand exceeds the available capacity to serve the population, resulting in a utilization rate of 114%. With these examples, it was observed that one region has greater capacity, while the current capacity of another region is not sufficient to meet the demand.

Furthermore, it is imperative to highlight the identification of candidate sites in each region. The selection of these sites was based on three essential criteria. Firstly, locations were chosen under the criterion that they are not close to existing PHUs, with a minimum distance of 3 km to ensure equitable access. Secondly, preference was given to areas with a minimum population of 500 inhabitants to

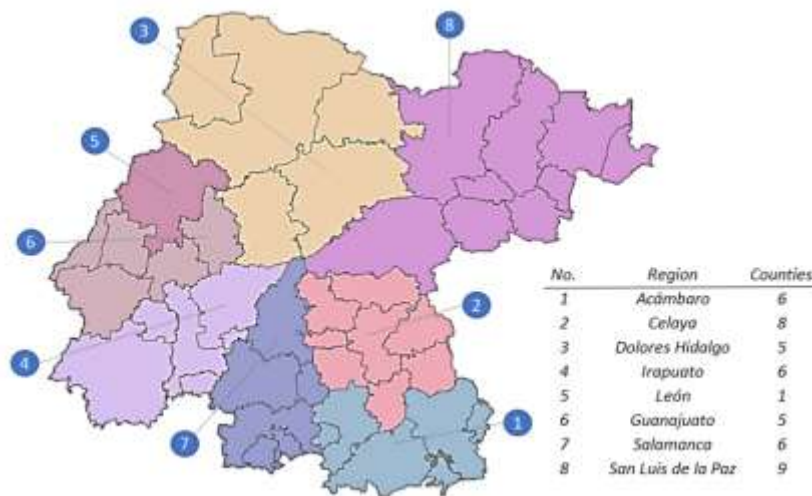


FIGURE 2: Territorial division in municipalities of the State of Guanajuato.

Table 1: Regional healthcare and demand data summary.

Region	Demand Points	Demand (inhabitants)	PHUs	Main Service		Candidate Sites
				Capacity (inhabitants)	% of Utilization	
1	650	219,599	64	396,000	55	20
2	1,260	570,838	81	630,000	91	35
3	1,398	365,851	63	429,000	85	100
4	1,303	497,621	69	543,000	92	69
5	988	685,565	62	687,000	100	44
6	980	328,068	47	288,000	114	32
7	963	409,419	58	480,000	85	42
8	1,362	362,808	71	432,000	84	144
Total	8,904	3,439,769	515	3,885,000	89	486

Source: Authors' elaboration based on INEGI (2020) [6] and Secretaría de Salud data [36, 37].

establish an effective population base. Lastly, candidate sites were selected, prioritizing distance from existing medical units, with a specific focus on addressing geographically remote or challenging-access regions. A total of 486 candidate sites were identified throughout the state of Guanajuato. These criteria serve as the foundational pillars of the strategy for locating new healthcare centers, with a strong commitment to maximizing their impact and promoting equity in the provision of medical services.

Table 2 illustrates the number of PHUs with complementary services available in each region, encompassing nutritional counseling (CS1), dental care (CS2), mental health (CS3), clinical tests (CS4), and imaging (CS5). It also incorporates the % demand for a concise overview of both service availability and proportional demand across regions. Notably, the availability of these services varies across different regions. For instance, it is worth noting that the number of CS1, CS2, and CS3 services is consistent across regions, as these services are typically considered foundational in most basic healthcare units. However, services such as clinical analysis and imaging exhibit disparities in their availability within certain healthcare units. Factors influencing this variation include financial resources, local demand, health policies, and hospital management decisions, all of which play a role in determining the presence of these services in a particular hospital or region. Additionally, a correlation is observed between the proportion of demand and the number of healthcare units with complementary services. For example, in region 5, which accounts for 20% of the total demand, it is notable that there is more healthcare units compared to other regions that have a lower percentage of the total demand. The planning and development of healthcare services are intricate and multifaceted endeavors, requiring a delicate balance between the population's needs and the resources at hand.

Table 3 offers an overview of the PHU types and their respective characteristics. The second column provides details on primary service capacity, indicating the number of individuals each facility can permanently serve. Facility type 1 has a capacity of 3,000 inhabitants, and subsequent facility types have

Table 2: Number of complementary services available in each region.

Region	Demand %	Complementary Services				
		CS1	CS2	CS3	CS4	CS5
1	6	10	10	10	5	4
2	17	18	18	18	11	9
3	11	7	7	7	5	5
4	15	11	11	11	9	9
5	20	35	35	35	14	7
6	9	6	6	6	5	4
7	12	11	11	11	8	7
8	10	7	7	7	7	6
Total	100	105	105	105	64	51

Source: Authors' elaboration based on data from Secretaría de Salud (DGIS) [36].

Table 3: Types of PHUs and the availability of their services.

Facility Type	Main service capacity (inhabitants)	Complementary Service Coverage				
		CS1	CS2	CS3	CS4	CS5
1	3,000	0	0	0	0	0
2	6,000	0	0	0	0	0
3	9,000	1	1	1	0	0
4	12,000	1	1	1	0	0
5	15,000	1	1	1	1	0
6	18,000	1	1	1	1	0
7	21,000	1	1	1	1	1
8	24,000	1	1	1	1	1
9	27,000	1	1	1	1	1
10	30,000	1	1	1	1	1
11	33,000	1	1	1	1	1
12	36,000	1	1	1	1	1
Critical coverage radius (km)		5	5	5	10	10

Source: Authors' elaboration based on data from Secretaría de Salud (DGIS) [36].

capacities as multiples of this value, in accordance with the 2010 guidelines set by the **Mexican Ministry of Health**. The availability of these services for each facility type is presented in the following five columns as binary values (1 denoting service provision, 0 denoting absence). The potential to upgrade existing facilities to a higher-tier category depends on the specific type of settlement, incorporating factors such as population density, infrastructural development, and the overall needs of the community. Furthermore, the critical coverage radius (Rs) in kilometers for each complementary service is presented as a key aspect of the proposed analysis.

Budget determination

For the empirical analysis, five different budget scenarios were generated, as shown in **Table 4**. B1 is the minimum budget to have feasible solutions and B5 is the maximum budget required to get the best

Table 4: Budget scenarios for each region (1×10^3 MXN).

Region	Budgets				
	B1	B2	B3	B4	B5
1	439	579	859	1,138	1,418
2	714	838	1,088	1,337	1,586
3	1,062	1,315	1,821	2,327	2,834
4	1,022	1,203	1,565	1,927	2,288
5	874	934	1,054	1,174	1,294
6	595	709	939	1,169	1,399
7	731	895	1,222	1,548	1,875
8	1,354	1,651	2,245	2,839	3,434

Table 5: Ranges of Z_2 used for the Epsilon constraint method for Region and Budget (1×10^3 MXN).

Region	Z_2	B1	B2	B3	B4	B5
1	Min	865	928	999	1,032	1,039
	Max	879	938	1,003	1,033	
2	Min	2,512	2,609	2,748	2,796	2,808
	Max	2,649	2,724	2,789	2,808	
3	Min	1,133	1,273	1,411	1,508	1,524
	Max	1,178	1,297	1,443	1,513	
4	Min	2,096	2,209	2,328	2,373	2,379
	Max	2,176	2,257	2,347	2,377	
5	Min	3,290	3,354	3,397	3,411	3,413
	Max	3,413	3,413	3,413	3,413	
6	Min	1,254	1,345	1,445	1,490	1,497
	Max	1,363	1,416	1,478	1,496	
7	Min	1,712	1,809	1,931	1,980	1,989
	Max	1,809	1,878	1,960	1,986	
8	Min	1,148	1,365	1,538	1,600	1,611
	Max	1,271	1,411	1,556	1,602	

possible values for both objectives (Z_1 and Z_2) given the other constraints. To obtain the value of the minimum budget (B1), the problem was solved with the objective of minimizing the total cost, while removing constraint (9), and keeping all the other constraints. The objective function value obtained corresponds to B1. For the maximum budget (B5), the problem was solved with both objective functions (1) and (2) separately, and then, the problem was solved again by minimizing the total cost with the objective functions (1) and (2) as constraints using the values of the objective function obtained as bounds. The objective value of this last problem was used as B5. Then, B2, B3, and B4 represent budgets equally distributed between B1 and B5.

Table 6: Data regarding the five budget scenarios in each region.

Region	Budget (1×10^3 MXN)	Pareto Set Points	Mín. Unit Distance (m)	Max. Unit Distance (m)	Mín. % of demand coverage	Max. % of demand covered	Average Computing Time (s)
1	439	9	1,353	1,376	79	80	17
	579	6	1,352	1,376	85	86	7
	859	3	1,352	1,375	91	91	29
	1139	2	1,352	1,361	94	94	14
	1418	1	1,352	1,352	95	95	1
2	714	69	1,279	1,427	88	93	442
	838	57	1,279	1,421	91	95	238
	1088	53	1,279	1,412	96	98	108
	1337	33	1,279	1,362	98	98	103
	1586	1	1,279	1,279	98	98	12
3	1062	32	1,726	1,783	62	64	195
	1315	35	1,726	1,781	70	71	228
	1821	16	1,726	1,769	77	79	378
	2328	13	1,726	1,750	83	83	100
	2834	1	1,726	1,726	83	83	19
4	1022	54	1,385	1,420	85	88	126
	1203	49	1,385	1,416	89	91	89
	1565	33	1,385	1,413	94	94	66
	1927	21	1,385	1,417	95	96	52
	2289	1	1,385	1,385	96	96	20
5	874	43	906	1,063	96	100	216
	934	48	906	987	98	100	172
	1054	28	906	927	99	100	38
	1174	12	906	908	100	100	15
	1294	1	906	906	100	100	80
6	595	68	1,505	2,311	77	83	1,087
	709	53	1,505	2,153	82	86	1,163
	939	41	1,505	2,058	88	90	618
	1,169	33	1,505	1,916	91	91	558
	1399	1	1,505	1,505	91	91	6
7	731	66	1,289	1,485	84	88	154
	895	60	1,289	1,485	88	92	159
	1222	52	1,289	1,444	94	96	102
	1549	25	1,289	1,345	97	97	38
	1875	1	1,289	1,289	97	97	70
8	1354	75	1,535	1,736	63	70	174
	1651	37	1,535	1,604	75	78	105
	2245	31	1,535	1,592	85	86	108
	2839	13	1,535	1,551	88	88	296
	3434	1	1,535	1,535	89	89	32

Epsilon constraint implementation

In the epsilon constraint method, one objective function is defined as a constraint of the problem. In this case, the objective function Z_2 was changed to constraint as is shown in Section 4. The bound of this constraint was gradually modified to generate different Pareto points. In this case, one hundred equidistant bounds of Z_2 were generated. The ranges of the bounds obtained with the lexicographic optimization for each region and budget are shown in Table 5. It can be observed that for budget B5, there is only one unique solution.

RESULTS AND ANALYSIS

To solve all integer programming models generated with the Epsilon-constraint method, the Branch-and-Bound algorithm from CPLEX 20.1 solver was used, with the callable library of C++. The experiments were conducted on a computer with an Intel(R) Core (TM) i5-4590 processor running at 3.30 GHz, supported by 16 GB of RAM, and operating under Windows 10. All instances were solved with a CPU time limit of one hour.

Table 6 presents statistics for the five budget scenarios in each region. It covers the number of Pareto set points, the minimum unit distance, the maximum unit distance, the maximum percentage of demand covered, the minimum percentage of demand covered, and the B&B CPU time to solve the instances. To calculate the minimum unitary distance, the total distance traveled was divided by the total demand. Additionally, covered demand represents the average of the covered demand from the five services analyzed. It is important to note that the distance pertains to the Main Service (MS), while coverage applies to the Complementary Services (CS).

A total of 100 iterations were attempted for each instance of the model to determine the Pareto set in each region using the AUGMECON2 method. It is crucial to note that each instance involves solving the problem in a specific region with a defined budget. There is a significant variation in the number of Pareto points found and the percentage of demand covered based on the budget invested. For instance, for region 1 with a minimum budget of 438 million Mexican pesos (MXN), nine points out of one hundred Pareto points were obtained, covering up to 80% of the demand in the best case. Conversely, with the highest budget close to 1418 million MXN, only one point was identified in the Pareto frontier, covering 95% of the demand, representing a noteworthy 15% increase. The number of Pareto points varied from region to region, due to the size of the region and the number of demand points. The average computation time can be observed in column 8 for each region, with the overall average computation time being 286 seconds. This is a reasonable computation time, as there is no need to employ a heuristic procedure to solve the problem.

Two regions were selected as examples to show the Pareto frontiers for the different budgets. These results are presented in Figures 3 and 4, revealing distinct behaviors for both frontiers. For instance, region 5 corresponds to the region where the City of León is located, an urban area with advanced

infrastructure that already satisfies most needs, as depicted in Figure 3. Even with a minimum budget (B1), over 95% of the demand can be covered on average with complementary services. In contrast, in the rural region of San Luis de la Paz, classified as region 8, there is a noticeable need for more substantial investment. This is particularly evident when utilizing the maximum budget (B5) to ensure coverage of complementary services, only 90% of the demand was covered on average, as illustrated in Figure 4. This *variability* highlights the essential link between needs and budgetary amounts, determined by specific factors. Demographic differences, prevalent health conditions, geographic accessibility, socio-economic levels, and existing infrastructure play pivotal roles in this context. Larger populations or those

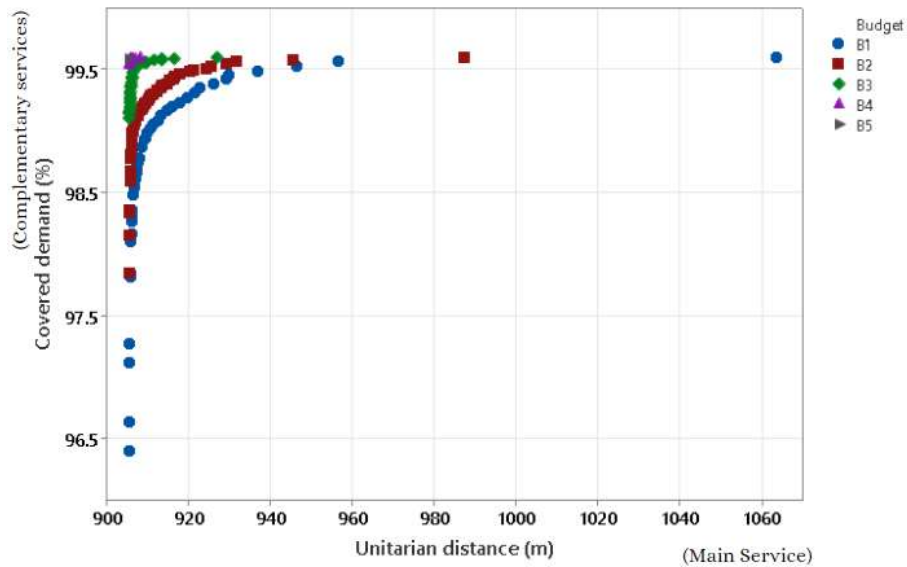


FIGURE 3: Representation of the Pareto Frontier of region 5.

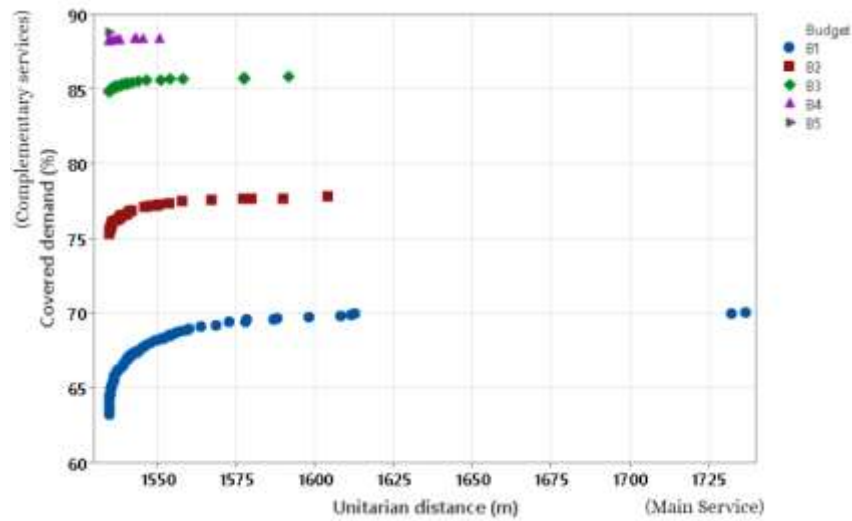


FIGURE 4: Representation of the Pareto Frontier of region 8.

with higher health challenges may require proportionally higher investment, while geography and socio-economic disparities also influence health demand and the need for investment. A meticulous assessment of these factors is essential to tailor health investment strategies that address the specific needs of each region.

Exemplification of results

In this section, the detailed results of a solution are presented. One solution of the Pareto set was chosen for each region for budget B2. To select a solution, the results were standardized with a scale from 0 to 1 for both objectives, where 0 represents the best solution for both objectives. Then, per region, the Pareto point with the Euclidean distance nearest to (0,0) was selected to exemplify the solution of the problem. In Figure 5, the Pareto set of each region for budget B2 is shown, highlighting with red the selected point.

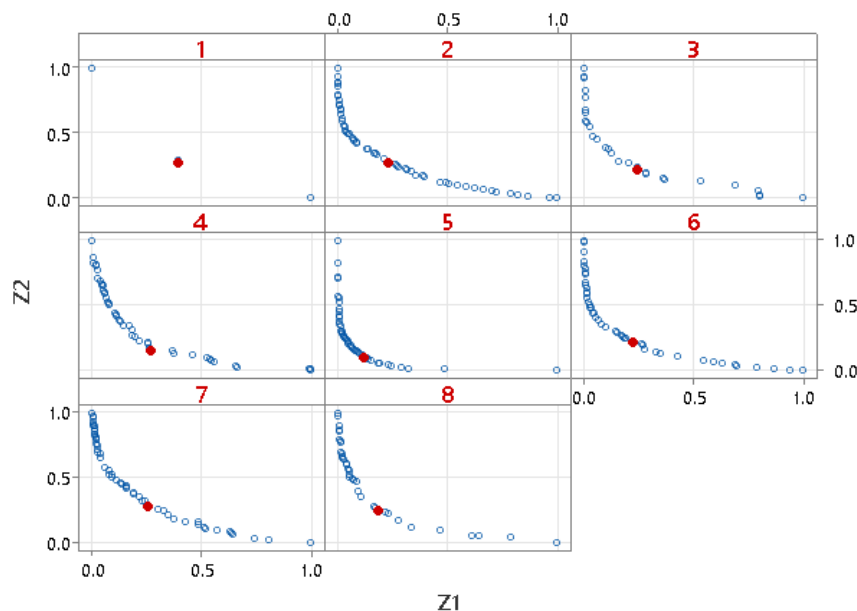


FIGURE 5: *The standardized Pareto set of each Region with a budget B2.*

Figure 6 illustrates the graphical representation of integrating the solutions of all the regions. The location of all facilities is shown, identifying the existing PHU that remains equal (HU), potential candidate sites with new PHUs (CS), and PHUs that have been upgraded (UPGRADE). There is a total of 853 existing PHUs, 486 candidate sites for new PHUs, and 170 PHUs that were upgraded with budget B2. The allocation of demand points for the main service is depicted in plot 7b, with connecting lines and colors representing demand allocation to each PHU, averaging a Euclidian distance of approximately 2.083 km for each assignment across all regions.

The coverage of complementary services is displayed in plots 6 c–e. Black points represent demand points and circular shapes represent healthcare units providing the complementary service. Any point covered by the circular shape indicates the coverage radius of PHUs with the complementary service installed. All relevant information about these healthcare units with complementary services is presented

in Table 7. For instance, 76% of demand points are covered for CS1, representing 91% of the total demand. It is observed that the same solution was found for CS2 and CS3 due to their identical coverage radius and availability in the same types of facilities. For CS4, there are 96 PHUs with this service, accounting for 9.63% of the total. For CS5, 71% of demand points are covered, representing 85% of the total demand. Overall, these solutions provide short assignment distances for the main service, and the coverage level of complementary services is highly efficient. CS5 has the lowest coverage rate; a strategy to improve its coverage could involve promoting collaboration between PHUs to share resources and optimizing CS5 coverage, especially in areas with higher demand but underutilized PHUs.

Table 7: Data related to facilities with complementary services.

Service	Complementary services				
	Nutritional counseling	Dental care	Psychological attention	Clinical analysis	Imaging
PHUs with service	241	241	241	96	85
% of PHUs	24.17%	24.17%	24.17%	9.63%	8.53%
% of demand coverage	91%	91%	91%	86%	85%
% demand point coverage	76%	76%	76%	73%	71%

CONCLUSIONS

In this article, the planning of primary healthcare infrastructure has been addressed with a specific focus on the Mexican healthcare system, considering the challenges of ensuring equitable access to essential services under limited-resource conditions. The results emphasize the critical importance of achieving comprehensive medical service coverage to improve care delivery in resource-constrained environments. A significant inverse relationship between travel distance and total investment costs has been identified, highlighting the need for efficient allocation of healthcare resources and strategic network design, particularly in settings with restricted budgets, which are common in developing countries.

The proposed bi-objective mixed-integer programming model has proven effective for simultaneously addressing facility location, capacity expansion, and complementary service integration. By leveraging real data from the state of Guanajuato, the study demonstrates the model's applicability and relevance, strengthening its role as a decision-support tool for healthcare network planning. Additionally, the

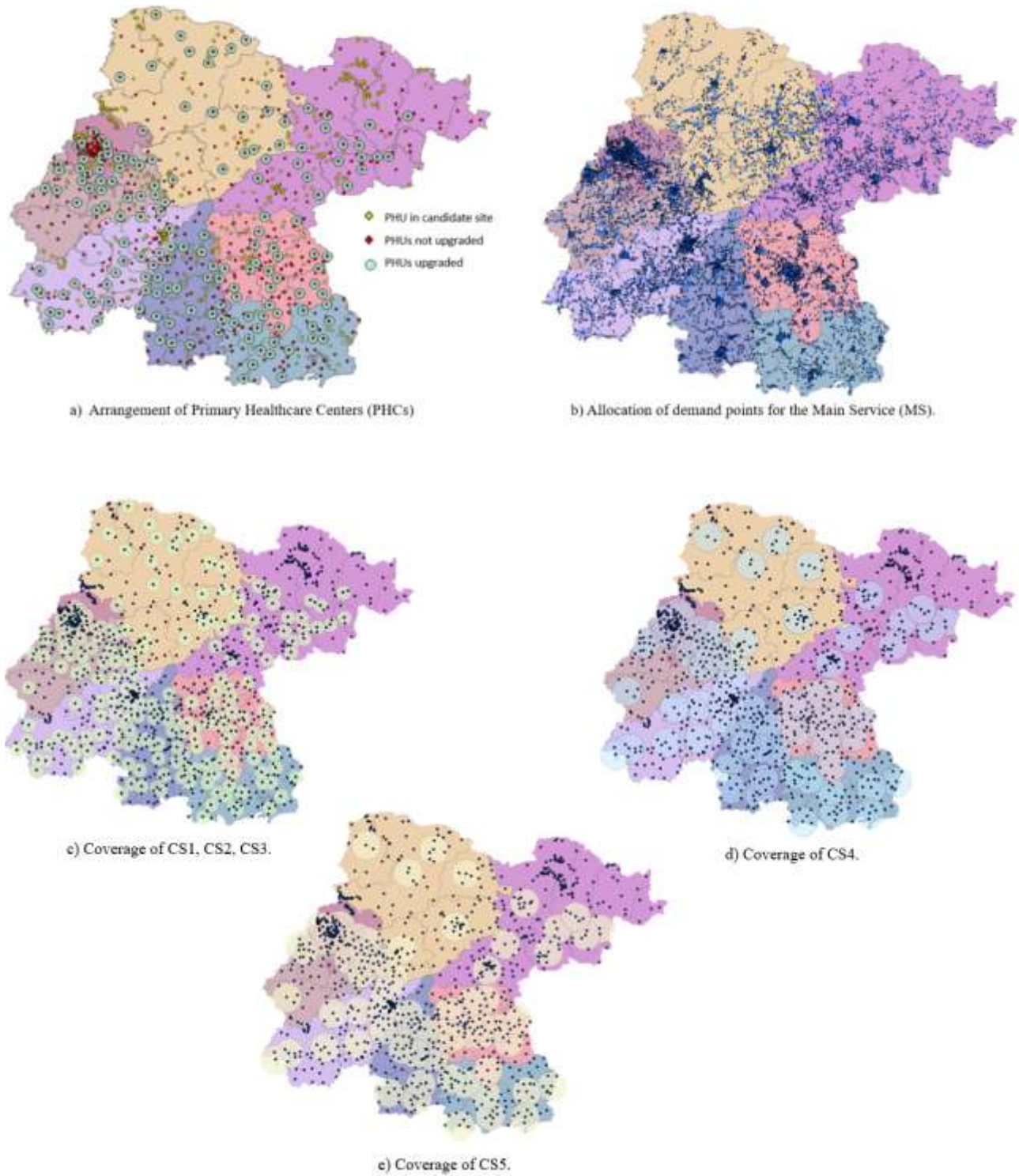


FIGURE 6: *Graphical Representation of the solutions in the state of Guanajuato.*

optimization of complementary service coverage under strict budgetary constraints has been shown to be critical for achieving balanced and equitable access to healthcare. Although the focus has been on the Mexican healthcare system, the methodology can be readily extended to other developing regions with similar structural and socio-economic limitations.

From a broader perspective, this work frames healthcare infrastructure planning within the context of a multi-tier service supply network, where decisions on facility siting, resource allocation, and service portfolio design closely mirror challenges traditionally addressed in supply chain network optimization. This cross-disciplinary perspective underscores the potential to leverage techniques from supply chain research to enhance resilience, equity, and efficiency in healthcare delivery systems.

Future research will explore advanced multi-objective optimization approaches to improve Pareto frontier generation, develop heuristics and decomposition techniques to address large-scale scenarios, and extend the case study to a nationwide analysis. Additionally, integrating infrastructure from other healthcare institutions such as the Mexican Social Security Institute (IMSS), the Institute for Social Security and Services for State Workers (ISSSTE), and the Social Security Institute for the Mexican Armed Forces (IMSSS) into the planning framework is identified as a relevant direction to achieve coordinated and efficient healthcare service networks. Another promising direction is to strengthen the empirical basis of the case studies by incorporating more detailed data sources, such as road-network-based distance matrices or estimated travel times, particularly for coverage-related services. This would allow the model to capture accessibility conditions more accurately, especially in rural areas where distances and times may diverge significantly due to transportation constraints.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORES Y COLABORADORES

Michael J. Park: Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Software, Visualización, Redacción – borrador original. **Rodolfo Mendoza-Gómez:** Conceptualización, Metodología, Supervisión, Validación, Redacción – revisión y edición.

REFERENCES

- [1] World Health Organization, “Primary health care,” *Fact Sheets*, [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/primary-health-care>
- [2] A. Sigmund, “The Frank Michota Memorial Lecture 2022: ‘Health Disparities in PeriOperative Medicine: The Urgent Need for Diversity in Healthcare’ By William McDade MD, PhD,” *Perioper. Care Oper. Room Manag.*, vol. 28, p. 100263, 2022, doi: 10.1016/j.pcorm.2022.100263.
- [3] U.S. Department of Health & Human Services, “About the Affordable Care Act (ACA),” [Online]. Available: <https://www.hhs.gov/healthcare/about-the-aca/index.html>
- [4] Secretaría de Salud (México), “Redes de Servicios de Salud,” [Online]. Available: <https://www.gob.mx/salud/acciones-y-programas/redes-de-servicios-de-salud>

- [5] R. Mendoza-Gómez and R. Z. Ríos-Mercado, “Location of primary health care centers for demand coverage of complementary services,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 169, p. 108237, 2022, doi: 10.1016/j.cie.2022.108237.
- [6] Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), “Derechohabiencia,” [Online]. Available: <https://www.inegi.org.mx/temas/derechohabiencia/>
- [7] G. Mavrotas and K. Florios, “An improved version of the augmented ϵ -constraint method (AUGMECON2) for finding the exact Pareto set in multi-objective integer programming problems,” *Appl. Math. Comput.*, vol. 219, no. 18, pp. 9652–9669, 2013, doi: 10.1016/j.amc.2013.03.002.
- [8] R. Z. Farahani and M. Hekmatfar, Eds., *Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies*. Springer, 2009, doi: 10.1007/978-3-7908-2151-2.
- [9] G. Laporte, S. Nickel, and F. S. da Gama, Eds., *Location Science*. Springer, 2019, doi: 10.1007/978-3-030-32177-2.
- [10] A. Ahmadi-Javid, P. Seyedi, and S. S. Syam, “A survey of healthcare facility location,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 79, pp. 223–263, 2017, doi: 10.1016/j.cor.2016.05.018.
- [11] E. D. Güneş, T. Melo, and S. Nickel, “Location problems in healthcare,” in *Location Science*, G. Laporte, S. Nickel, and F. S. da Gama, Eds. Springer, 2019, pp. 657–686, doi: 10.1007/978-3-030-32177-2_23.
- [12] J. C. Papageorgiou, “Some operations research applications to problems of health care systems (a survey),” *Int. J. Biomed. Comput.*, vol. 9, no. 2, pp. 101–114, 1978.
- [13] V. L. Smith-Daniels, S. B. Schweikhart, and D. E. Smith-Daniels, “Capacity management in health care services: Review and future research directions,” *Decis. Sci.*, vol. 19, no. 4, pp. 889–919, 1988, doi: 10.1111/j.1540-5915.1988.tb00310.x.
- [14] S. Rahman and D. K. Smith, “Use of location-allocation models in health service development planning in developing nations,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 123, no. 3, pp. 437–452, 2000, doi: 10.1016/S0377-2217(99)00289-1.
- [15] M. S. Daskin and L. K. Dean, “Location of health care facilities,” in *Operations Research and Health Care: A Handbook of Methods and Applications*, vol. 70, M. L. Brandeau, F. Sainfort, and W. P. Pierskalla, Eds. Springer, 2005, pp. 43–76, doi: 10.1007/1-4020-8066-2_3.
- [16] A. Rais and A. Viana, “Operations research in healthcare: A survey,” *Int. Trans. Oper. Res.*, vol. 18, no. 1, pp. 1–31, 2011, doi: 10.1111/j.1475-3995.2010.00767.x.
- [17] R. Z. Farahani, M. SteadieSeifi, and N. Asgari, “Multiple criteria facility location problems: A survey,” *Appl. Math. Model.*, vol. 34, no. 7, pp. 1689–1709, 2010, doi: 10.1016/j.apm.2009.10.005.
- [18] C. H. Chung, D. A. Schilling, and R. Carbone, “The capacitated maximal covering problem: A heuristic,” in *Proc. 14th Annu. Pittsburgh Conf. Modeling and Simulation*, 1983, pp. 1423–1428.
- [19] J. R. Current and J. E. Storbeck, “Capacitated covering models,” *Environ. Plann. B*, vol. 15, no. 2, pp. 153–163, 1988, doi: 10.1068/b150153.

- [20] H. Pirkul and D. A. Schilling, “The maximal covering location problem with capacities on total workload,” *Manage. Sci.*, vol. 37, no. 2, pp. 233–248, 1991, doi: 10.1287/mnsc.37.2.233.
- [21] P. Yin and L. Mu, “Modular capacitated maximal covering location problem for the optimal siting of emergency vehicles,” *Appl. Geogr.*, vol. 34, pp. 247–254, 2012, doi: 10.1016/j.apgeog.2011.11.013.
- [22] D. Chauhan, A. Unnikrishnan, and M. Figliozzi, “Maximum coverage capacitated facility location problem with range constrained drones,” *Transp. Res. C Emerg. Technol.*, vol. 99, pp. 1–18, 2019, doi: 10.1016/j.trc.2018.12.001.
- [23] H. K. Smith, P. R. Harper, and C. N. Potts, “Bicriteria efficiency/equity hierarchical location models for public service application,” *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 64, no. 4, pp. 500–512, 2013, doi: 10.1057/jors.2012.68.
- [24] S. Beheshtifar and A. Alimohammadi, “A multiobjective optimization approach for location-allocation of clinics,” *Int. Trans. Oper. Res.*, vol. 22, no. 2, pp. 315–328, 2015, doi: 10.1111/itor.12088.
- [25] P. Mitropoulos, I. Mitropoulos, I. Giannikos, and A. Sissouras, “A biobjective model for the locational planning of hospitals and health centers,” *Health Care Manag. Sci.*, vol. 9, no. 2, pp. 171–179, 2006, doi: 10.1007/s10729-006-7664-9.
- [26] P. Mitropoulos, I. Mitropoulos, and I. Giannikos, “Combining DEA with location analysis for the effective consolidation of services in the health sector,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 40, no. 9, pp. 2241–2250, 2013, doi: 10.1016/j.cor.2012.01.008.
- [27] R. Mendoza-Gómez, R. Z. Ríos-Mercado, and K. B. Valenzuela-Ocaña, “An efficient decision-making approach for the planning of diagnostic services in a segmented healthcare system,” *Int. J. Inf. Technol. Decis. Mak.*, vol. 18, no. 5, pp. 1631–1665, Apr. 2019, doi: 10.1142/S0219622019500196.
- [28] R. Mendoza-Gómez, R. Z. Ríos-Mercado, and K. B. Valenzuela-Ocaña, “An iterated greedy algorithm with variable neighborhood descent for the planning of specialized diagnostic services in a segmented healthcare system,” *J. Ind. Manag. Optim.*, vol. 16, no. 2, pp. 857–885, 2020, doi: 10.3934/jimo.2018182.
- [29] R. Mendoza-Gómez and R. Z. Ríos-Mercado, “Regionalization of primary health care units with multi-institutional collaboration” *Socioecon. Plann. Sci.*, vol. 83, p. 101343, 2022, doi: 10.1016/j.seps.2022.101343.
- [30] R. Mendoza-Gómez and R. Z. Ríos-Mercado, “Regionalization of primary health care units: An iterated greedy algorithm for large-scale instances,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 250, p. 123924, 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2024.123924.
- [31] M. E. Elorza, N. S. Moscoso, and A. M. Blanco, “Assessing performance in health care: A mathematical programming approach for the re-design of primary health care networks,” *Socioecon. Plann. Sci.*, vol. 84, p. 101454, 2022, doi: 10.1016/j.seps.2022.101454.
- [32] R. Mendoza-Gómez and R. Z. Ríos-Mercado, “Maximal covering location with partial coverage for second-level specialized health care services,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 169, p. 106725, 2024, doi: 10.1016/j.cor.2024.106725.

- [33] S. J. Vicencio-Medina, Y. A. Rios-Solis, O. J. Ibarra-Rojas, N. M. Cid-Garcia, and L. Rios-Solis, “The maximal covering location problem with accessibility indicators and mobile units,” *Socioecon. Plann. Sci.*, vol. 87, p. 101597, 2023, doi: 10.1016/j.seps.2023.101597.
- [34] G. Mavrotas and K. Florios, “An improved version of the augmented ε -constraint method (AUGMECON2) for finding the exact Pareto set in multi-objective integer programming problems,” *Appl. Math. Comput.*, vol. 219, no. 18, pp. 9652–9669, 2013, doi: 10.1016/j.amc.2013.03.002.
- [35] G. Mavrotas, “Effective implementation of the ε -constraint method in multi-objective mathematical programming problems,” *Appl. Math. Comput.*, vol. 213, no. 2, pp. 455–465, 2009, doi: 10.1016/j.amc.2009.03.037.
- [36] Secretaría de Salud (México), “Dirección General de Información en Salud (DGIS),” [Online]. Available: <https://www.gob.mx/salud/acciones-y-programas/direccion-general-de-informacion-en-salud-dgis>

Reabastecimiento Conjunto para la Gestión de Inventarios de Partes de Repuesto: Caso de Estudio

Joint Replenishment for Spare Parts Inventory Management: Case Study

Sánchez Guzmán, V.¹ , Loza-Hernandez, L.^{1*} , Bustos Rosales, A.² , Vázquez Aranda, S.¹ 
(*llozahernandez@yahoo.com)

Recibido: 04-09-2025

Aceptado: 21-09-2025

RESUMEN

En el sector automotriz, específicamente en la rama de autopartes, equilibrar los costos y la disponibilidad de productos es una tarea compleja. El objetivo de este trabajo es proponer una política de inventario que minimice los costos totales de inventario y satisfaga la demanda de los clientes de una empresa de autopartes en México, además de mostrar soluciones alternativas a los problemas derivados de la falta de una gestión adecuada de inventarios. Para lograr este objetivo, se propuso una metodología para facilitar la puesta en práctica de los tomadores de decisiones, se realizó un análisis de las autopartes para seleccionar las de mayor interés para la empresa

y pronosticar su demanda mediante modelos ARIMA. Posteriormente, se compararon las políticas de inventario para la revisión periódica y continua de dichos productos. Finalmente, se aplicó el sistema de reabastecimiento conjunto propuesto por Atkins e Iyogun a la mejor política que permite la existencia de faltantes y la ausencia de faltantes, logrando que los artículos con baja demanda se incluyan en los pedidos de artículos con alta rotación. Los resultados indican que la mejor política de inventario a aplicar en la compañía es la política de revisión continua.

Palabras clave: Gestión de inventarios, Política de reabastecimiento conjunto de autopartes, Inventario de revisión periódica, Inventario de revisión continua.

ABSTRACT

In the automotive sector, specifically in the auto parts branch, balancing costs and product availability are an arduous task. The objective of this work is to propose an inventory policy

that minimizes total inventory costs and satisfies customers' demand for an automotive spare parts company in Mexico, in addition to showing alternative solutions to problems derived from the lack of proper inventory

¹ Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México. Paseo Universidad S/N. Toluca, Estado de México, México. CP. 501301.

² Instituto Mexicano del Transporte, Instituto Mexicano del Transporte, km 12+000 Carretera Estatal No. 431, El Colorado-Galindo Sanfandila, Pedro Escobedo, Querétaro, C.P. 76703 México 3.



management. To carry out the objective, it proposes a methodology to facilitate the implementation of decision makers, an analysis of the spare parts was performed to select those of greatest interest to the company and forecast their demand using ARIMA models, then inventory policies for periodic review and continuous review of those products are compared. Finally, the joint resupply system proposed by Atkins and Iyogun was applied to the best policy allowing shortages and no

shortages, achieving that articles with low demand are included in the orders of articles with high turnover. The results indicate that the best inventory policy to apply in the company is the continuous revision policy.

Keywords: Inventory management, Joint replenishment for spare parts, Periodic review inventory policy, Continuous review inventory policy.

INTRODUCTION

Inventory management and control represent one of the most important activities in any organization [1]. The control of costs and the determination of efficient policies for maintenance and inventory management implies a reduction in expenses derived from its logistics or commercial activity and an increase in its profits [2].

Inventory management aims to determine and control inventory levels within physical inventory systems, so that the need for product availability and the need to minimize inventory-related costs are well balanced [3]. Another objective is to provide customers with a high level of service to avoid lost sales due to insufficient inventory [2]. According to Axsäter [4], four fundamental components determine the inventory systems: demands, replenishments, costs, and constraints.

The goal of inventory management is to establish an optimal inventory policy that controls stock replenishment, minimizes inventory-related costs, and maintains customer service levels. In short, an inventory policy determines when to place an order for replenishment and how much each product orders.

The company under study is Mexican and is dedicated to selling automotive spare parts for suspensions and steering systems nationwide. It distributes around 1,000 products to the national market. The company is considered a leader in the spare parts industry, offering products of equivalent quality to original parts. The company does not have an efficient inventory management tool that considers costs and controls the number of spare parts in stock.

Based on information provided by the company staff, future demand was determined (previously predicted using ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) models [5], afterwards the appropriate inventory policies were calculated, so that the total cost of inventory management is minimized. Once the best inventory policy is found, a joint replenishment system proposed by Atkins and Iyogun [6] is used, allowing items with low demand to be included with fast moving item orders. Thus, it eliminates the need for higher configuration costs when the slow-moving item reaches its reorder

point. This work focuses on managing inventory with unknown or probabilistic demand and applying policies according to this type of demand. The selected policies are policy (s, S) (s -reorder point, S -target inventory) and the policy (R, S) (R -review period, S -target inventory). The goal is to determine the optimal policy for the inventory system so that the total cost across the entire system is minimized while meeting the target service level for customers for products that the company personnel determine as priorities.

This document shows the application of ARIMA forecasting models, as a basis to identify the demand for the products with fast movement of the company, case study; also, it presents in detail the inventory policy's comparison of continuous review versus periodic review to define the supply of products jointly and to propose an inventory policy for these products, according to the needs of the company.

The document has four more sections: the literature review, the methodology, the case study and results obtained from the application of the new inventory policy, and finally conclusions.

LITERATURE REVIEW

The main objective of inventory management is to answer the questions: 1) How often should the inventory be reviewed? 2) When should it be replenished? and 3) What quantity should it be replenished to? [7]. The first question is answered according to the inventory control policy that companies apply to their inventories. The second question can be answered in two ways: i) inventory must be replenished when the quantity of product (stock) is equal to or less than s (reorder point) units. ii) inventory can be replenished every R (review period) unit of time. While the possible answers to the third question are: i) Q (fixed order quantity) units are always added to the inventory, or ii) a quantity is replenished such that, when it is incorporated into the inventory, the inventory level reaches the value of S (target inventory) units [5 - 7]. The main goal of these questions is to provide the desired level of customer service at a minimal cost. The first model to answer the third question was developed ten decades ago by Harris in 1913, who called this model EOQ (Economic Order Quantity) [8].

Inventory models can be classified into deterministic and stochastic models. Deterministic models assume a known demand and delivery time with certainty, on the other hand, stochastic models, demand, and delivery times are not known with certainty [7]. The objective of the probabilistic model is to determine the moment of issuance of the replenishment and the quantity to order, subject to the uncertainty of the demand and / or any other parameter [9].

Taking the above into account, the following inventory policies are considered: i) continuous review policies (s, Q) and (s, S) . The policy (s, Q) requests a fixed quantity of Q each time the inventory position falls to the order point or lower, on the other hand, the policy (s, S) occurs when the stock decreases as it is ordered to raise the position of the inventory up to level S . ii) periodic review policies (R, S) and (R, s, S) , the policy (R, S) every R units of time, is ordered enough to raise the position of the inventory at level S [7]. Another variable is the delivery period (denoted by L known as lead time), which represents

the time interval that elapses between when an order is requested until the moment when the said order is added to stock [10 -15].

Due to the random component that the demands for spare parts have, it is necessary to show revision systems with probabilistic demand, allowing the safety stock calculus (S) which dampens the demand for spare parts [16]. For this case study, the continuous review policies (s, S) and the periodic review policy (R, S), proposed by [7] for inventory control with probabilistic demands, were selected, which are detailed below.

Policy (s, S)

This inventory control system assumes continuous review, and as the (s, Q) system is performed each time the inventory position falls to order point s or less. However, in contrast to the (s, Q) system, a variable replenishment quantity is used, ordering just enough to bring the inventory position up to level S [2 - 4, 9]. If all demand transactions are of unit size, both systems are identical because the replenishment request will always be made when the inventory position is exactly s ; that is, $S = s + Q$ [2]. This policy was addressed by [17], using mixed integer nonlinear programming to determine the almost optimal parameters and, later, using mixed integer linear programming for comparison and improving the model. For the application of the inventory management policy of continuous review (s, S), the formulas Ec. (1), Ec. (2), Ec. (3), Ec. (4), Ec. (5) y Ec. (6) proposed by [14] are used:

Order size:

$$Q = EOQ = \sqrt{\frac{2AD}{vr}} \quad (1)$$

where:

A = cost of configuration to order

D = annual demand

v = product cost

r = maintenance rate

Standard deviation of predicted errors on replacement time L :

$$\sigma_L = \hat{\sigma}_1 \sqrt{L} \quad (2)$$

where:

$\hat{\sigma}_1$ = forecast standard deviation

L = lead time

Special function of normal distribution:

$$G_u(k) = \frac{Q}{\sigma_L} (1 - P_2) \quad (3)$$

where:

Q = Order size

σ_L = Standard deviation of predicted errors on replacement time L

P_2 = probability or rate of existence of the product

Expected demand over replacement time L :

$$s = \hat{x}_L + k\sigma_L \quad (4)$$

where:

d = average monthly demand

Reorder point:

$$s = \hat{x}_L + k\sigma_L \quad (5)$$

where:

$\hat{x}_L = \text{Expected demand over replacement time } L$

$\sigma_L = \text{Standard deviation of predicted errors on replacement time } L$

$k = \text{security factor}$

Relevant total cost:

$$TRC = \frac{AD}{Q} + \left[\frac{Q}{2} + k\sigma_L \right] vr + \frac{D}{Q} (B_2 v) \sigma_L G_u(k) \quad (6)$$

where:

$B_2 = \text{fractional charge per missing unit}$

Policy (R, S)

This inventory control system assumes a periodic review, it is also known as a replenishment cycle system, which is of common use particularly in companies without sophisticated computer control. It is also frequently seen, when items are ordered from the same vendor or require resource sharing. The control procedure is that each R time units (which is at each review instant) is ordered enough to raise the inventory position to level S . The system (R, S) offers a regular opportunity (each R time units) to adjust the order down to the S level, a desirable point if the demand pattern changes over time. The main disadvantages of the system (R, S) are that replenishment quantities vary, and maintenance costs are higher than in continuous review systems [3].

For the application of the periodical review inventory management policy (R, S) , the following formulas proposed by [3] are used Ec. (7), Ec. (8), Ec. (9) y Ec. (10):

Expected demand on replacement time L :

$$\hat{x}_{R+L} = d(R + L) \quad (7)$$

where:

$R = \text{review period}$

Reorder point:

$$s = \hat{x}_{R+L} + k\sigma_{R+L} \quad (8)$$

where:

$$\sigma_{R+L} = \sqrt{\frac{R+L}{2}} * \sigma_1 \sqrt{R} \quad (9)$$

Relevant total cost:

$$TRC = \frac{A}{R} + \left[\frac{DR}{2} + k\sigma_{R+L} \right] vr + \frac{1}{R} (B_2 v) \sigma_{R+L} G_u(k) \quad (10)$$

Where the variables integrated into Ec.8, 9, and 10 have the same meaning already described in the policy (s, S) . In general, a certain amount of product must be kept in inventory for the efficient operation of a business. This quantity is conditioned or depends on the products' demand in the market. The demand must be satisfied with the amount of inventory stored. The classic inventory management models consider that the demand is known and constant. However, this situation, in which future demands are precisely known, is rare in practice [4, 16].

These two inventory policies, proposed in this case study, have been widely studied for the management of different types of inventories, a bibliographic review was carried out applying different methods for 2012 to 2015 for perishable items [17]. Studies for different types of demands have been developed, using mixed integer nonlinear programming, heuristics such as Silver-Meal and the Wagner-Whitin algorithm, which are promising for certain types of demands [20]. [21] proposed a Lagrangian relaxation approach for capacity limitations to obtain optimal solutions in the planning of replenishment of multi-products with dynamic demand, which integrates customer returns to the inventory for future sales or their elimination if these spare parts reduce the capacity of the warehouse. [22] proposed an inventory system for automotive spare parts considering various levels according to backorders and discounts for quantities requested from suppliers. [23] present a non-linear programming model for entire order cycles and determines the optimal quantity of orders that propose the best inventory policy that maximizes the profits per period of the company; inventory policy allows for shortages, such as backorders that are satisfied with immediate inventory replenishment. [24], through numerical approximation algorithms, they seek to determine the optimal order cycle and inventory levels, such a way that the expected profits for the case study company are maximized. [25] suggest a heuristic to determine the suitable inventory of various products in accordance with an inventory *policy* $(s-I, s)$ and the newspaper vendor type, which minimizes the expected value of the work in progress.

A joint replenishment system is when several items are ordered simultaneously rather than individually, the intention is to minimize the total cost by adding more line items to a replenishment. This is much less expensive than ordering items individually when the items are supplied by the same supplier [26]. A joint supply system looks for a balance between inventory review frequency decisions and order quantities; achieving a coordination of all products (items), considering that orders are made to a single supplier [8] or determine the supply policy that determines the joint order of products (independent demand) to minimize the cost of maintaining a production system, such as it is described by [27]. Within the review systems to perform joint replenishment, one of them is a periodic review system suggested by Atkins and Iyogun in 1988 [6], who developed an algorithm to perform a joint replenishment, which is adapted to the needs of the company under study.

This type of system aims to generate savings in ordering costs by allowing control over the main groups of items that can be ordered at the same time. These items are consumed simultaneously but fall within completely different review periods. This model developed by [6] makes possible to find the necessary quantities and the appropriate review periods for the products [7]. The Atkins and Iyogun procedure essentially allocate the highest cost by small quantity replenishment to the products that are produced or purchased more frequently, keeping the expected time for the next replenishment of these products in balance [3].

For the development of this algorithm, the *EOQ* is initially calculated using the Ec. (11):

$$EOQ_i = \sqrt{\frac{2a_i D_i}{rv_i}} \quad (11)$$

where:

a_i = lower cost of adding a product i

D_i = annual demand for product i

v_i = unit cost of product i

At the same time, the equivalent time supply is calculated for each product, using only the lowest setup cost a_i assuming one year as 50 weeks Ec. (12).

$$T_i = \frac{EOQ_i(50)}{D_i} \text{ weeks} \quad (12)$$

With this, a supply time T_i is obtained for each item within a product family, then the product with the smallest time supply is chosen and labelled as product 1. A small portion α_1 of the highest cost A , is assigned to this product. The idea is to eventually allocate all the major cost to various products in the family. If all the cost were spread over a single product, its **EOQ** could increase significantly, same as its supply time [3].

Assigning more and more α_1 to the first product increases its supply time, eventually to the point where it matches the supply time of the second most frequently purchased product. Now, allocate more of the main installation or replenishment costs to product 1, and some to product 2, keeping supply times in balance. When these two equal supply times increase to the time supply of the third most frequently purchased product, start assigning α_3 to this third product.

This process continues until the entire main configuration is assigned, that is $\sum_i \alpha_i = 1$. Therefore, the total cost of the setup is accounted for each time a family is ordered [3]. The total cost for an item is expressed as $(\alpha_i A + a_i)$, it is easy to solve for a supply time given by Ec. (13):

$$\alpha_i = \frac{T_i^2 r_i v_i D_i}{2A} - \frac{a_i}{A} \quad (13)$$

where:

A = cost of configuration to order

METHODOLOGY

This document proposes the methodology shown in Figure 1 to facilitate follow-up in solving the case study problem and similar problems in different productive sectors, which consists of six stages for its execution.

An explanation in detail of each of the stages is described below.

1. Identification of the system: This corresponds to the periodicity or frequency which the inventories are carried out in the company, characteristics of the products in terms of supply movement, and customer demand.
2. ABC Classification: A selection of products is made according to the relevance of the products through the Pareto method, which shows the classification of products based on their importance for the company's sales and the number of products. 80% of sales are represented by 20% of stock products [20].
3. Determination of demand: Based on the analysis of demand patterns, it means the data provided by the case study company shows stationarity, seasonality, trend, and variability.

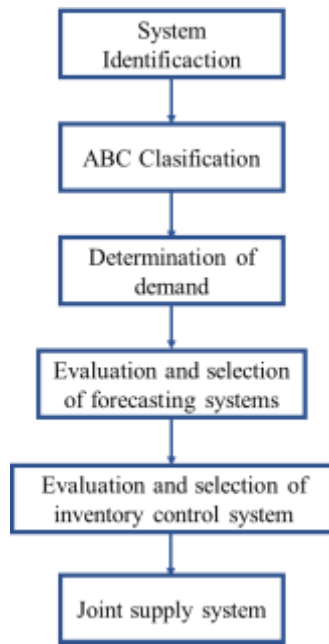


FIGURE 1: *Methodology proposed for inventory management. Source: Own elaboration.*

4. Evaluation and selection of forecasting systems: To calculate future demands based on the behavior of product demand. In this work classical forecasting models and ARIMA models were evaluated, where ARIMA models got the lowest forecast errors
5. Evaluation and selection of inventory control system: This work focuses on probabilistic inventory management systems where demand is uncertain. The applied policies are policy (s, S) and policy (R, S).
6. Joint supply system: At this point, a balance is sought between the frequency of inventory review decisions and the quantities to be ordered; achieving the coordination of all products, assuming that orders are made to a single supplier. The periodic review system applied is based on the algorithm suggested by [6].

However, this methodology can be applied to similar problems, where the goal is to develop an inventory policy considering specific characteristics of the products and productive sectors.

RESULTS

As it was mentioned, the company under study is Mexican-owned and was founded in 1982. It is a marketer of spare parts for suspension and steering in the auto parts market. It is renowned nationally as a supplier of automotive parts, handling around 1,000 SKUs (Stock Kee-ping Units). Currently the company does not have a spare parts inventory management and control tool, as expected, there are low service levels due to a lack of materials, as well as an excess of components and finished products in the warehouse, which justifies the development of this job.

The application of the proposed methodology for inventory management to the case study is as follows:

System identification

The company under study does not have a specific inventory control system, currently the inventory is controlled empirically based on the experience of the personnel in charge to the activity, which also, varies subjectively according to the experience of the staff, for this reason an adequate inventory management system is proposed for the selected products.

ABC classification

With the application of the Pareto principle, 160 articles of type A were obtained out of the 1,000 articles in total. The 15 items selected for this proposal belong to classification A, which are those that require major control due to their movement and customer demand (based on information provided by company staff).

Determination of demand

From the articles of classification A, it was concluded that they present demand with trend and, for some items their demand is stationary, generally showing variable demand. The 15 selected articles present trends, in addition to variability, and only one presents stationary demand. Figure 2, Figure 3, and Figure 4 show the demand behaviour of the products during the analyzed period.

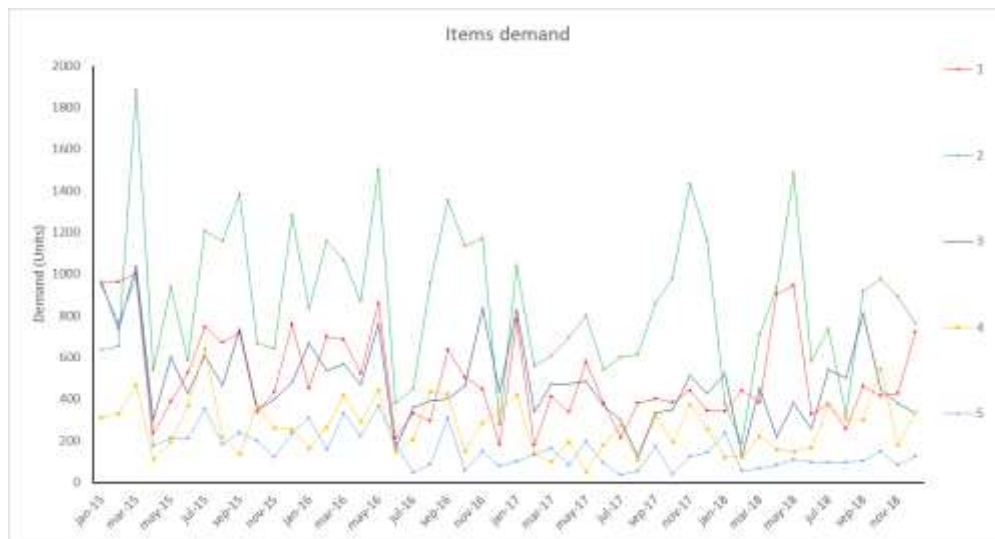


FIGURE 2: *Example of demand behaviour of products (1, 2, 3, 4, and 5) analyzed. Source: Own elaboration.*

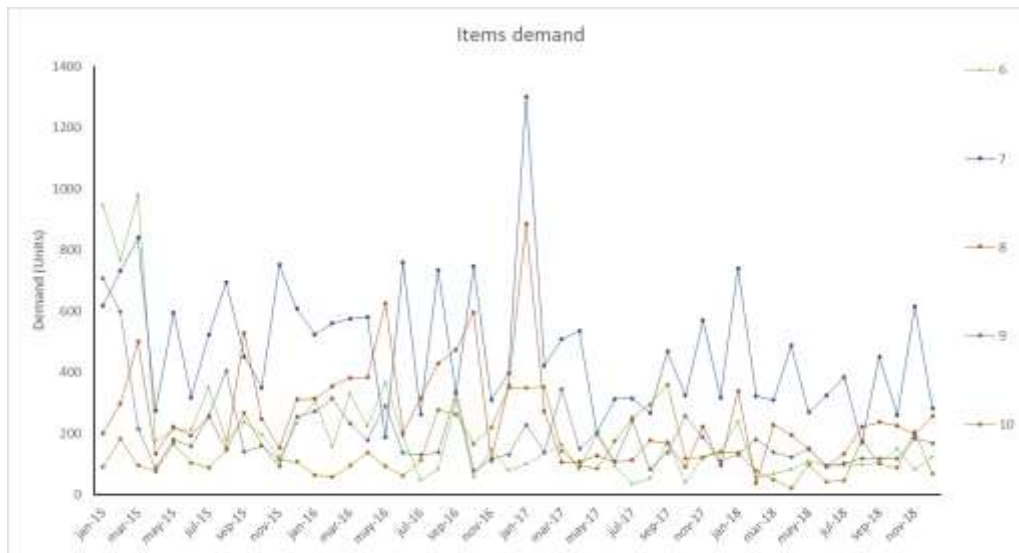


FIGURE 3: *Example of demand behaviour of products (6, 7, 8, 9, and 10) analyzed. Source: Own elaboration.*

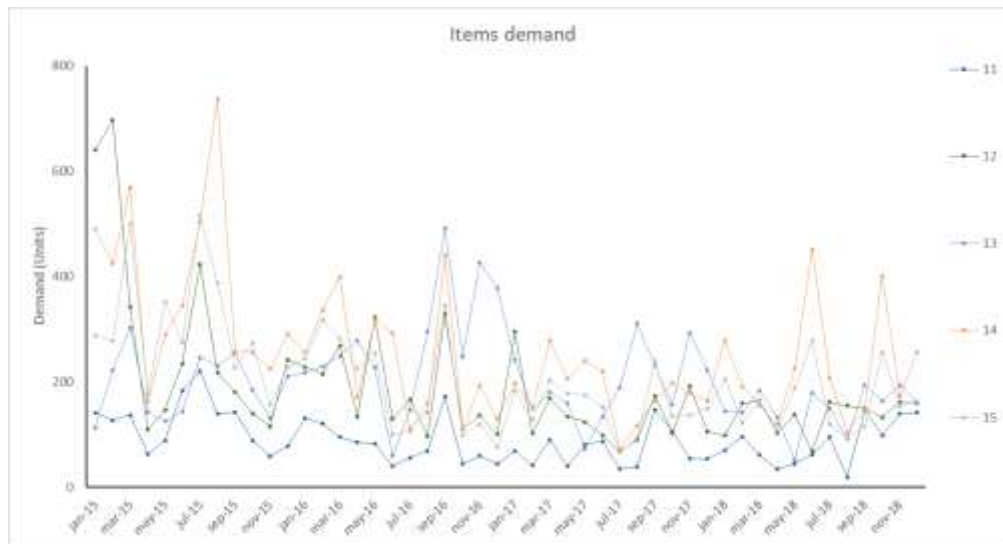


FIGURE 4: *Examples of demand behaviour of products (11, 12, 13, 14 and 15) analyzed. Source: Own elaboration.*

Figures 2, Figure 3, and Figure 4 show that the demand behavior of each of the products analyzed is very varied, to determine to calculate an adequate forecast for each of them.

Table 1 shows the measures of central tendency for each product and allows it to see the distribution of the demand, which shows that they have a very wide dispersion and do not behave normally as expected, therefore, they will need to be analyzed deeply to calculate the forecast for each product.

Table 1: Measures of central tendency of the demand.

Item	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Mean	508	864	481	267	281	199	477	262	197	149	90	188	202	257	204
Standard Deviation	228	362	201	128	132	202	216	165	122	90	45	127	87	137	101
Variance	51807	131342	40434	16364	17401	40644	46835	27244	14997	8108	2030	16088	7564	18719	10221

Source: Own elaboration with information provided by company staff.

Evaluation and selection of forecasting systems

To determine the demand forecasts of the products, the classical quantitative forecasting methods were applied, however, the results obtained for the performance measures known as MAPE (mean absolute percentage error), MSD (mean square-red deviation) and MAD (mean of the absolute deviations) [5] were not satisfactory, so ARIMA models were applied, which presented the lowest mean absolute percentage error for selected products (an average of 15%) -[5] shows in detail the procedure to calculate forecasts of historical data series applying ARIMA method-. Subsequently, the demand forecasts for the 15 selected products were calculated (Table 2).

Table 2: Demand forecasts for selected products.

	Item														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
d (units/ month)	392	777	460	172	279	189	321	270	210	149	110	189	202	258	210

Source: Own elaboration with information provided by company staff

Evaluation and selection of the inventory control system

In this stage, a joint supply system is considered, which seeks a balance between the frequency of inventory review decisions and the quantities to be ordered, based on the data obtained from the characteristics of the products and the information got from the company staff. Then, a periodic review system suggested by [6] is applied.

In Table 3, the data for 15 products of the spare parts company are shown. The demand forecasts were previously obtained using ARIMA forecasting models, whose models yielded the lowest forecasting errors compared to classical forecasting methods, this demand data is used for the selection of the optimal inventory policy (s, S) or (R, S). Additional data is provided by the personnel of the company.

The Figure 5 shows the difference of safety stock between the inventory policies evaluated, where it is shown that there is a greater safety stock in the periodic review inventory policy, which directly impacts the total costs of the inventory policy.

Table 4 shows the comparison of the results obtained for the inventory policies proposed.

Table 3: Data for 15 selected products.

Constants	Items														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
d (units / month)	392	777	460	172	279	189	321	270	210	149	110	189	202	258	210
σ (units)	105	163	96	55	58	70	89	81	59	60	33	45	50	72	38
L (month)	3														
v (\$ / units)	2.65	3.72	3.05	3.73	3.06	1.77	4.77	5.7	3.65	6.79	7.8	3.74	3.98	3.14	3.17
A (\$ / order)	65														
r (\$ / \$ / year)	20%														
P_2	95%														
B_2	0.52	0.55	0.48	0.56	0.25	0.31	0.56	0.7	0.87	0.53	0.91	0.55	0.42	0.52	0.53

Backorders allowed

Source: Own elaboration with information provided by company staff.

Table 4: Comparison of inventory policies.

Item	Inventory policy (units)	Safety Stock SS (units)	Relevant Total Cost TRC (DLS) Backorders	Difference (DLS)	Relevant Total Cost TRC (DLS) without backorders	Difference (DLS)
1	Continue (s, S)	(1676, 2933)	53	\$ 916.54	\$ 933.60	\$77.50
	Periodic (R, S)	(2, 2851)	134	\$ 977.77	\$ 1011.10	
2	Continue (s, S)	(2760, 4104)	144	\$ 1989.61	\$ 2,033.51	\$52.52
	Periodic (R, S)	(2, 4538)	190	\$ 2043.96	\$ 2,086.03	
3	Continue (s, S)	(1461, 2569)	29	\$ 1,085.97	\$ 1,105.20	\$47.04
	Periodic (R, S)	(2, 2501)	97	\$ 1,133.59	\$ 1,152.24	
4	Continue (s, S)	(822, 1923)	0	\$ 384.00	\$ 387.28	
	Periodic (R, S)	(2, 1442)	77	\$ 560.13	\$ 562.85	\$175.57
5	Continue (s, S)	(834, 1678)	0	\$ 642.32	\$ 649.06	
	Periodic (R, S)	(2, 1454)	59	\$ 725.32	\$ 728.89	\$79.83
6	Continue (s, S)	(535, 1135)	19	\$ 676.47	\$ 686.39	
	Periodic (R, S)	(2, 949)	89	\$ 797.18	\$ 804.86	\$118.47
7	Continue (s, S)	(993, 1593)	30	\$ 1,270.36	\$ 1,285.67	
	Periodic (R, S)	(2, 1749)	144	\$ 1,332.21	\$ 1,357.39	\$71.72
8	Continue (s, S)	(837, 1437)	27	\$ 1,409.69	\$ 1,440.52	
	Periodic (R, S)	(2, 1481)	131	\$ 1,480.46	\$ 1,506.22	\$65.70
9	Continue (s, S)	(650, 1250)	20	\$ 902.57	\$ 922.14	
	Periodic (R, S)	(2, 1145)	95	\$ 1,004.09	\$ 1,023.22	\$101.08
10	Continue (s, S)	(467, 1067)	20	\$ 954.12	\$ 968.23	
	Periodic (R, S)	(2, 842)	97	\$ 1,059.82	\$ 1,074.93	\$106.70
11	Continue (s, S)	(341, 941)	11	\$ 1,006.37	\$ 1,030.13	
	Periodic (R, S)	(2, 604)	54	\$ 1,106.04	\$ 1,127.25	\$97.12
12	Continue (s, S)	(582, 1182)	15	\$ 881.74	\$ 900.40	
	Periodic (R, S)	(2, 1018)	73	\$ 978.44	\$ 997.17	\$96.77
13	Continue (s, S)	(623, 1223)	17	\$ 710.33	\$ 720.30	
	Periodic (R, S)	(2, 1091)	81	\$ 803.23	\$ 811.22	\$90.92
14	Continue (s, S)	(798, 1398)	24	\$ 766.47	\$ 778.99	
	Periodic (R, S)	(2, 1406)	116	\$ 866.46	\$ 877.74	\$98.75
15	Continue (s, S)	(643, 1243)	13	\$ 667.47	\$ 678.62	
	Periodic (R, S)	(2, 1112)	62	\$ 753.69	\$ 763.21	\$84.5

Source: Own elaboration with information provided by company staff



FIGURE 5: Comparison of inventory policies through safety stock. Source: Own elaboration.

The Figure 6 shows the difference between the inventory policies evaluated considering inventory shortages and without shortages, which shows that there is a greater difference in the total costs of the policies when there are shortages, directly impacting on the total cost and customer service, the latter being one of the most important indicators in the evaluation of inventory policies.

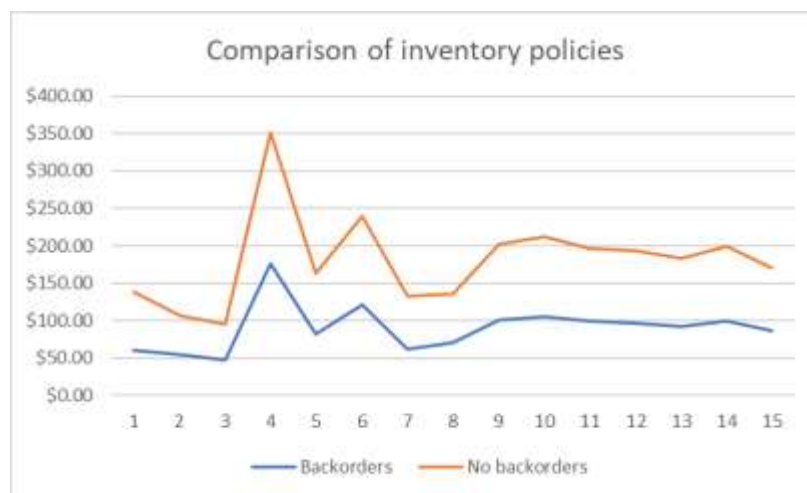


FIGURE 6: Comparison of inventory policies with shortages and without shortages. Source: Own elaboration.

In addition, for the policy of periodic review, the Atkins and Iyogun [6] algorithm for a joint replenishment is applied, the results are shown in Table 5, 6, and 7. These results clearly indicate that the best inventory policy to apply in the company is the continuous revision policy, since it would save \$ 1,515.11 (DLS) per year for these 15 articles studied.

Joint supply system

Following the policy of continuing review and applying the Atkins and Iyogun algorithm for joint replenishment with backorders allowed, the results shown in Table 5 and 6 are obtained, also results for joint replenishment without backorders allowed are shown in Table 7:

Table 5: Calculations EOQ and T .

Item	Demand (units)	v (DLS)	EOQ (units)	T (weeks)
1	5964	2.65	300	2.52
2	11280	3.72	348	1.54
3	6672	3.05	296	2.22
4	2724	3.73	171	3.14
5	4044	3.06	230	2.84
6	3108	1.77	265	4.26
7	4920	4.77	203	2.06
8	4212	5.7	172	2.04
9	3228	3.65	188	2.91
10	2508	6.79	122	2.42
11	1716	7.8	94	2.73
12	2808	3.74	173	3.09
13	3024	3.98	174	2.88
14	3960	3.14	225	2.84
15	2976	3.17	194	3.26

Source: Own elaboration with information provided by company staff.

Table 6: Values obtained using Atkins and Iyogun.

Item	α_i	T (weeks)	Rounding T	EOQ (units)
1	0.066	3.276	4	478
2	0.216	3.276	4	903
3	0.091	3.276	4	534
4	0.026	3.276	4	218
5	0.063	3.276	4	324
6	0	3.276	4	249
7	0.121	3.276	4	394
8	0.139	3.276	4	337
9	0.041	3.276	4	259
10	0.07	3.276	4	201
11	0.04	3.276	4	138
12	0.012	3.276	4	225
13	0.024	3.276	4	242
14	0.064	3.276	4	317
15	0.027	3.276	4	239

Source: Own elaboration with information provided by company staff.

Following the Atkins and Iyogun algorithm, the α_i are calculated for each product, and the new periods and EOQ are obtained for each product with backorders allowed. Table 6 shows the results.

Table 6 shows the optimal order quantity to be requested in the rounded week period (column 4), the α value indicates the proportional amount that is increased to Q to satisfy the demand in the number of

weeks in which the joint order will be made, for this policy shortages are allow at the end of the period, so it is necessary for all cases to multiply by the obtained alpha constant; which as indicated in the introduction requires the application of iterations to identify the best value.

These new review periods and EOQ are the ones that best suit the company to generate savings in costs for joint replenishment without backorders. Table 7 shows the results.

Table 7: Values obtained using Atkins and Iyogun algorithm.

Item	α_i	T (weeks)	Rounding T	EOQ (units)
1	-	7.45	6	716
2	0.7111	5.26	4	902
3	0.2889	6.45	6	801
4	-	9.45	8	436
5	-	8.41	8	647
6	-	4.26	4	249
7	-	6.45	6	590
8	-	5.26	4	337
9	-	9.04	8	516
10	-	7.45	6	301
11	-	8.41	8	275
12	-	9.04	8	449
13	-	8.63	8	484
14	-	8.63	8	634
15	-	9.45	8	476

Source: Own elaboration with information provided by company staff.

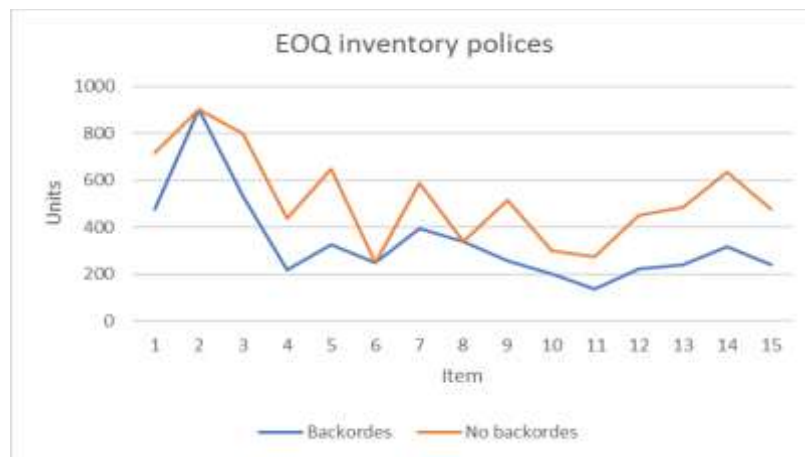


FIGURE 7: Comparison of EOQ for the inventory policy with shortages and without shortages.

Source: Own elaboration.

Similarly, as detailed in Table 6, Table 7 shows the optimal order quantity that should be requested in the rounded week period to satisfy the demand in the number of weeks in which the joint order will be made; for this policy, shortages are not allowed at the end of the period. Figure 7 shows the differences.

Figure 6 shows the difference in optimal order quantities, which demonstrates that when shortages are allowed, the quantity ordered in period T is lower, while if shortages are not allowed, the optimal order quantity increases considerably, which is subsequently reflected in the total inventory cost.

CONCLUSIONS

The automotive parts industry is complex due to the variability of its products' demand and the importance of maintaining high standards, [28 - 30] shows an example of this situation in the auto parts industry. Forecasts are a powerful tool that copes with these types of difficulties and the expected changes in the future, thus contributing to the generation of economic benefits for companies.

Product demand forecasting enables the development of adequate inventory policies that minimize cost while considering the level of service offered by companies. The inventory models used are classified based on assumptions about demand, review periods, shortages, costs, and lead times. Additionally, it is important to mention that all models seek to optimize their replenishment policies by minimizing their total costs, which in most models a fixed order cost is used, a maintenance cost of inventory and missing costs.

Regarding the inventory policies used, it is recommended to prioritize probabilistic methods since in itself the demand for the products of this company always tends to be variable. Additionally, good product coordination reduces resupply costs, as observed in the case study of automotive spare parts companies. This allows items with low demand to be included in orders of high-demand items.

On the other hand, this article contributes to the literature in this area of knowledge by proposing a methodology that is intuitively and separately applied in the productive sector by people responsible for developing these activities. Furthermore, this work applies the methodology, which allows for determining an inventory policy considering the characteristics of the products and the detailed analysis of the demand for each of them to establish an inventory policy with joint replenishment. It should be noted that based on the reviewed literature, companies of all sizes and different sectors avoid using this type of inventory policy due to its complexity, even when savings in their total costs are demonstrable. Therefore, the application of the proposed methodology serves as support to decision-makers and personnel dedicated to these tasks in the different productive sectors.

STATEMENT OF CONTRIBUTION OF AUTHORS AND CONTRIBUTORS

Sánchez Guzmán, V.: Data curation, Research, Writing - Preparation of the original draft. **Loza-Hernandez, L.:** Conceptualization, Methodology, Research, Writing. **Bustos Rosales, A.:** Review and Editing. **Vázquez Aranda, S.:** Supervision and Validation.

REFERENCES

- [1] E. Mwamba and T. Yangailo, “The Impact of Inventory Management on the Performance of an Organization,” *Revista científica profundidad construyendo future*, vol. 20, no. 20, pp. 77–85, 2024, doi: 10.22463/24221783.4184.
- [2] S. Nahmias and T. L. Olsen, *Production and Operations Analysis*. Long Grove, IL, USA: Waveland Press, Inc., 2015.
- [3] E. A. Silver, D. F. Pyke, and R. Peterson, *Inventory and Production Management in Supply Chains*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017.
- [4] S. Axsäter, *Inventory Control*, International Series in Operations Research & Management Science. Cham, Switzerland: Springer, 2015.
- [5] S. Makridakis and S. C. Wheelwright, *Métodos de pronósticos*. México, D.F.: Limusa, 2009.
- [6] D. Atkins and P. Iyogun, “Periodic versus ‘can-order’ policies for coordinated multi-item inventory systems,” *Management Science*, vol. 34, no. 6, pp. 791–796, Jun. 1988.
- [7] X. Ma, R. Rossi, and T. Archibald, “Stochastic Inventory Control: A Literature Review,” *IFAC PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 1490–1495, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.11.410.
- [8] M. A. Bushuev, A. Guiffrida, M. Y. Jaber, and M. Khan, “A review of inventory lot sizing review papers,” *Management Research Review*, vol. 38, no. 3, pp. 283–298, 2015, doi: 10.1108/MRR-09-2013-0204.
- [9] R. H. Ballou, *Business Logistic Management*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, 2003.
- [10] R. A. Davis, *Demand-Driven Inventory Optimization and Replenishment: Creating a More Efficient Supply Chain*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2016.
- [11] A. Kimms, *Multi-Level Lot Sizing and Scheduling: Methods for Capacitated, Dynamic, and Deterministic Models (Production and Logistics)*. Heidelberg, Germany: Physica-Verlag HD, 1996.
- [12] V. Suhandi and P.-S. Chen, “Joint Replenishment Dealing with Various Inventory Policies,” in *Proc. 13th Annu. Int. Conf. Industrial Engineering and Operations Management*, 2023, doi: 10.46254/AN13.20230083.
- [13] A. R. Ravindran and J. D. P. Warsing, *Supply Chain Engineering: Models and Applications*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2013.
- [14] I. T. Christou, *Quantitative Methods in Supply Chain Management: Models and Algorithms*. Berlin, Germany: Springer, 2013.
- [15] R. Ramya, C. Rajendran, H. Ziegler, S. Mohapatra, and K. Ganesh, *Capacitated Lot Sizing Problems in Process Industries*. Cham, Switzerland: Springer, 2019.
- [16] M. Hajiaghaei-Keshteli, S. M. Sajadifar, and R. Haji, “Determination of the economic policy of a three-echelon inventory system with (R, Q) ordering policy and information sharing,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 55, pp. 831–841, 2011, doi: 10.1007/s00170-010-3112-6.
- [17] E. Porteus, *Foundations of Stochastic Inventory Theory*. Stanford, CA, USA: Stanford Business Books, 2002.

- [18] M. Xiang, R. Rossi, B. Martin-Barragán, and S. A. Tarim, “Computing non-stationary (s, S) policies using mixed integer linear programming,” *European Journal of Operational Research*, vol. 271, no. 2, pp. 490–500, 2018, doi: 10.1016/j.ejor.2018.05.030.
- [19] L. Janssen, T. Claus, and J. Sauer, “Literature review of deteriorating inventory models by key topics from 2012 to 2015,” *International Journal of Production Economics*, vol. 182, pp. 86–112, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.ijpe.2016.08.019.
- [20] R. Kian, Ü. Gürler, and E. Berk, “The dynamic lot-sizing problem with convex economic production costs and setups,” *International Journal of Production Economics*, vol. 155, pp. 361–379, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.ijpe.2014.02.006.
- [21] I. Karakayali et al., “Capacitated replenishment and disposal planning for multiple products with resalable returns,” *Annals of Operations Research*, vol. 203, no. 1, pp. 325–350, Sep. 2013, doi: 10.1007/s10479-012-1112-7.
- [22] P. Samouei et al., “A network approach modeling of multi-echelon spare-part inventory system with backorders and quantity discount,” *Annals of Operations Research*, vol. 226, pp. 551–563, 2015, doi: 10.1007/s10479-014-1718-z.
- [23] L. A. San-José et al., “Profit maximization in an inventory system with time-varying demand, partial backordering and discrete inventory cycle,” *Annals of Operations Research*, 2021, doi: 10.1007/s10479-021-04161-6.
- [24] S. Poormoaid, “Inventory decision in a periodic review inventory model with two complementary products,” *Annals of Operations Research*, 2021, doi: 10.1007/s10479-021-03949-w.
- [25] M. Varas, F. Basso, and A. Lüer-Villagra, “Managing premium wines using an (s–1, s) inventory policy: A heuristic solution approach,” *Annals of Operations Research*, vol. 280, pp. 351–376, 2019, doi: 10.1007/s10479-019-03266-3.
- [26] B. Roushdy, N. Sobhy, A. Abdelhamid, and A. Mahmoud, “Inventory Control for a Joint Replenishment Problem with Stochastic Demand,” *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 873–877, 2011.
- [27] N. Salari and V. Makis, “Joint maintenance and just-in-time spare parts provisioning policy for a multi-unit production system,” *Annals of Operations Research*, vol. 287, pp. 351–377, 2020, doi: 10.1007/s10479-019-03371-3.
- [28] E. Montes de Oca-Sánchez and L. Loza-Hernández, “Comparativo de métodos de pronóstico en series de tiempo para la demanda de repuestos automotrices,” *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, vol. 33, no. 94, e545, 2025, doi: 10.33064/icycuaa2025945451.
- [29] E. M. Alvarez, M. C. Van der Heijden, and W. H. M. Zijm, “Service differentiation in spare parts supply through dedicated stocks,” *Annals of Operations Research*, vol. 231, no. 1, pp. 283–303, 2015, doi: 10.1016/j.ijpe.2012.02.019.
- [30] T.S. Winter, J.H. van Vuuren, “A Practical Method for Joint Inventory Replenishment under Supplier Constraints”. *South African Journal of Industrial Engineering*, vol.36 n.2. 2025. doi.org/10.7166/36-2-3194

Implementación de un Sistema de Control de Temperatura y humedad en un Invernadero Ejidal con Iot

Implementation of a Temperature and Humidity Control System in a Common Greenhouse Using IoT

Padilla-Macías, E.¹, Ortiz-Aguilar, L.^{1*}  Funes-Tapia, J.¹  Xoca-Orozco, L.¹ 
(*ldm_oa@hotmail.com)

Recibido: 12-06-2025 Aceptado: 23-09-2025

RESUMEN

Este artículo describe la implementación de un sistema de bajo costo para el monitoreo de temperatura y humedad en invernaderos ejidales, utilizando tecnologías de Internet de las Cosas (IoT). El desarrollo se orienta a atender la necesidad de productores en Guanajuato, México, que enfrentan limitaciones para acceder a sistemas comerciales de automatización debido a su alto costo. La solución propuesta integra sensores DHT11 para temperatura y humedad ambiental, un sensor NPK para humedad del suelo, un microcontrolador ESP32 y la plataforma ThingSpeak para la gestión y visualización de datos en la nube. La arquitectura del sistema se organizó en cuatro capas: infraestructura física, comunicación mediante WiFi, almacenamiento en la nube y acceso remoto para el usuario. Durante las pruebas preliminares, realizadas en un invernadero

ejidal, se registraron temperaturas entre 29,4 °C y 42,5 °C y humedad relativa entre 24 % y 39 %, además de valores diferenciales de humedad del suelo entre distintos puntos del túnel. Se diseñó también una carcasa protectora para mejorar la durabilidad de los componentes electrónicos bajo condiciones ambientales adversas. Los resultados muestran que, aunque existen limitaciones en la precisión y resistencia de los sensores de bajo costo, el sistema permite generar información útil y en tiempo real para la gestión del invernadero. Esto contribuye a la toma de decisiones en el riego y la ventilación y sienta bases para mejorar la planificación de la producción, la trazabilidad y la integración con la cadena de suministro agrícola.

Palabras clave: Invernadero ejidal, Control de tem-

¹Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón



peratura y humedad, Internet de las cosas (IoT), Sensores ambientales, Agricultura inteligente, Automatización agrícola, Tecnologías de bajo costo, Optimización agrícola.

ABSTRACT

This article presents the implementation of a low-cost IoT-based system for monitoring temperature and humidity in communal greenhouses in Guanajuato, Mexico. The solution integrates DHT11 sensors for ambient temperature and humidity, an NPK sensor for soil moisture, an ESP32 microcontroller, and the ThingSpeak platform for cloud data management and visualization. The architecture was structured in four layers: physical infrastructure, WiFi communication, cloud storage, and remote user access. Preliminary tests recorded temperature values between 29,4 °C y 42,5 °C and relative humidity between 24 % and 39 %, while soil moisture measurements revealed spatial variability within the greenhouse. A protective casing was also de-

signed to increase the durability of electronic components under adverse environmental conditions. Although the accuracy and robustness of low-cost sensors impose certain limitations, the system provides real-time data that supports decisions on irrigation and ventilation. These results highlight its potential to enhance production planning, facilitate traceability, and facilitate integration into the agricultural supply chain.

Keywords: Communal greenhouse, Temperature and humidity control, Internet of Things (IoT), Environmental sensors, Smart agriculture, Agricultural automation, Low-cost technologies, Agricultural optimization.

INTRODUCCIÓN

Los invernaderos son importantes en el sector agrícola; en Guanajuato es uno de los estados de los cuales forma parte con producciones de frutas y verduras en la entidad. Un invernadero es vital para el cuidado de los cultivos del cual se necesitan diversos requerimientos para su uso, como lo es el presupuesto de instalación, el tipo de estructura que se desea utilizar y el control de las plagas que debe realizarse con regularidad [1].

En consecuencia, se puede tener una baja producción y eficiencia, que a su vez produce un bajo índice de producción, puede dar un impacto negativo significativo al sector agrícola [2].

En el estado de Guanajuato existen diferentes invernaderos ejidales que cuentan con la problemática de no llevar histórico de datos de sus cosechas, medición de variables de temperatura, etc. Lo anterior se debe a que los sistemas sofisticados de automatización son muy caros y difíciles de comprar para los dueños de los invernaderos. Por ello, a lo anterior se diseñó un sistema de bajo costo que sea aplicable y replicable para instalar en invernaderos. Dicho sistema comenzó con el diseño en un software especializado de la estructura interna del lugar, donde se detalló posteriormente una red de sensores de humedad

y temperatura, de además comparar tecnologías de bajo costo que sean eficientes y duraderas ante las condiciones ambientales que puede presentar un invernadero, para que de este modo pueda arrojar datos de almacenados en la nube y que sean accedidos por el dueño y técnicos.

Este artículo consta de cinco secciones posteriores, la primera es el estado del arte en cuanto a trabajos relacionados a invernaderos inteligentes. La sección dos es el marco teórico del trabajo. La sección tres es donde se detalla la metodología y finalmente en la sección de resultados las conclusiones y el trabajo futuro.

ESTADO DEL ARTE

En el trabajo realizado por [10], se propuso un modelo de integración de tecnologías IoT e inteligencia artificial (IA) para convertir invernaderos automatizados en entornos inteligentes. Los autores desarrollaron una plataforma hardware-software basada en dispositivos embebidos y algoritmos de predicción (como Random Forest), implementados en Python, para optimizar el control climático, riego y ventilación en un invernadero experimental de la Universidad de Alicante. El diseño, estructurado en capas (sensores, control, comunicación y servicios en la nube), demostró su eficacia al predecir temperaturas internas con un error cuadrático medio (RMSE) aceptable, integrando subsistemas previamente independientes. Sin embargo, la escalabilidad del modelo en invernaderos más grandes o con cultivos diversos requiere validación adicional, así como la inclusión de algoritmos de IA más avanzados, como redes neuronales profundas, para mejorar la precisión en condiciones climáticas extremas.

En la investigación realizada por [11], se desarrolló un sistema IoT automatizado para invernaderos hidropónicos, diseñado para satisfacer las demandas de comunidades locales mediante el análisis predictivo del mercado y el control preciso de variables ambientales. Los autores implementaron una red de sensores inalámbricos basada en ZigBee para monitorear factores críticos como temperatura, humedad, CO_2 , pH y oxígeno disuelto, integrando actuadores como bombas de agua, generadores de CO_2 y luces LED. Los datos se procesaron en la nube mediante algoritmos de aprendizaje automático (redes neuronales artificiales y LSTM) para predecir rendimientos agrícolas y optimizar condiciones de cultivo. A diferencia de sistemas tradicionales, este modelo combina automatización con recomendaciones de mercado en tiempo real, logrando un enfoque integral desde la producción hasta la comercialización. Sin embargo, la dependencia de conectividad 2.5G o 3G para la transmisión de datos podría limitar su escalabilidad en zonas rurales con infraestructura deficiente.

En el trabajo realizado por [12], se implementó un sistema de riego automatizado para invernaderos utilizando Controladores Lógicos Programables (PLC), combinando temporizadores basados en reloj y sensores de humedad del suelo. Los autores diseñaron un prototipo en miniatura con dos macetas: una regada únicamente por temporización (07:00 AM diariamente) y otra con riego adicional activado por un sensor capacitivo de humedad conectado a Arduino, que enviaba señales al PLC. El sistema demostró

ser eficiente, mostrando una diferencia de 450 ml en el consumo de agua después de 10 días, evidenciando el funcionamiento del riego complementario basado en sensores. Sin embargo, el estudio identificó limitaciones en la monitorización en tiempo real del estado del suelo, ya que la única retroalimentación era indirecta (variación en el volumen de agua). La investigación destaca la viabilidad del PLC para automatizar tareas repetitivas en invernaderos, aunque su escalabilidad a sistemas más complejos requiere validación adicional.

MARCO TEÓRICO

El diseño de un sistema de monitoreo ambiental en invernaderos requiere una base conceptual que vincule la infraestructura agrícola con las tecnologías de Internet de las Cosas (IoT). A continuación, se presentan los elementos teóricos que sustentan este trabajo, organizados en torno a la función de los invernaderos, los sensores utilizados y el módulo de procesamiento y comunicación.

INVERNADERO

Un invernadero puede definirse como una estructura diseñada para modificar y controlar las condiciones ambientales que rodean un cultivo, con el fin de optimizar su crecimiento y desarrollo. De acuerdo con [3], estas construcciones pueden estar constituidas por marcos metálicos o plásticos, cubiertos por materiales translúcidos que permiten el paso de radiación solar suficiente para la fotosíntesis. Además, como menciona [4], los invernaderos no solo protegen a los cultivos de factores externos como plagas o condiciones climáticas adversas, sino que también pueden incluir sistemas de captación de agua de lluvia y de ventilación controlada.

Según Moreno Vega [5], el diseño y construcción de un invernadero condiciona en gran medida su eficiencia. Existen diversas tipologías que varían en función del material y la geometría de la cubierta:

- **Estructura metálica:** Generalmente de acero galvanizado, permite mayor durabilidad y es la más común en invernaderos de mediana y gran escala.
- **Estructura de cerámica u hormigón:** Menos comunes, usadas en regiones específicas, como en Italia, por su capacidad de almacenamiento térmico.
- **Estructura de madera:** Tradicional en invernaderos artesanales, contruidos con maderas locales como eucalipto o pino.
- **Estructura mixta:** Combinan materiales (acero-madera o acero-hormigón) para equilibrar costos y resistencia estructural, frecuentes en modelos multitúnel.

En este proyecto, el sistema IoT se implementó en un invernadero ejidal con estructura metálica, lo cual facilitó la instalación de sensores y dispositivos, así como el tendido de cableado eléctrico y de comunicación.



Figura 1: *Ejemplo de invernadero.*

SENSORES PARA MONITOREO AMBIENTAL

El núcleo de un sistema IoT agrícola es la red de sensores, encargada de capturar en tiempo real variables críticas del microclima y del suelo. En este trabajo se emplearon dispositivos de bajo costo, seleccionados por su disponibilidad en el mercado y su aplicabilidad en contextos de recursos limitados.

SENSOR DHT11

El sensor DHT11 mide simultáneamente temperatura y humedad relativa del aire. Su rango de operación es de 0°C a 50°C y 20 % a 90 % de humedad, con un margen de error aproximado de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ y $\pm 5\%$, respectivamente. Aunque su precisión es moderada, resulta adecuado para aplicaciones de monitoreo continuo en invernaderos, donde el objetivo principal es identificar tendencias y fluctuaciones más que realizar mediciones de laboratorio [6]. En este proyecto, el DHT11 fue la base para generar series de tiempo de las variables ambientales.

SENSOR LC-1329

El LC-1329 es un dispositivo de referencia que mide temperatura y humedad ambiental mediante infrarrojos. Su uso en este trabajo se centró en validar las mediciones del DHT11, lo que permitió establecer márgenes de error y verificar la confiabilidad del sistema de bajo costo. Como indican [8], este tipo de sensores, aunque diseñados para aplicaciones residenciales, resultan útiles como patrones comparativos en entornos experimentales.

SENSOR DE HUMEDAD Y NUTRIENTES DEL SUELO (NPK)

El sensor NPK proporciona información simultánea sobre humedad y concentración relativa de tres nutrientes esenciales para las plantas: nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Estos parámetros son críticos en la agricultura de precisión, dado que el nitrógeno es fundamental para el crecimiento foliar, el fósforo interviene en la transferencia de energía y la formación de semillas, y el potasio regula procesos fisiológicos como la turgencia celular [9]. En este proyecto, el sensor NPK permitió detectar diferencias de humedad entre zonas del invernadero, además de proveer datos complementarios para una futura inte-

gración con estrategias de fertilización de precisión. Es importante señalar que este dispositivo no aporta nutrientes al suelo, sino que mide indirectamente su disponibilidad en la matriz edáfica.

MÓDULO ESP32

El ESP32 es un microcontrolador de bajo costo que integra conectividad WiFi y Bluetooth, además de múltiples entradas y salidas digitales y analógicas. De acuerdo con [11], este chip se caracteriza por su bajo consumo energético y su versatilidad en proyectos IoT. En el sistema desarrollado, el ESP32 cumplió la función de concentrador de datos, recopilando información de los sensores y enviándola a la nube a través de la plataforma ThingSpeak. Su integración fue fundamental para asegurar el acceso remoto a los datos en tiempo real.

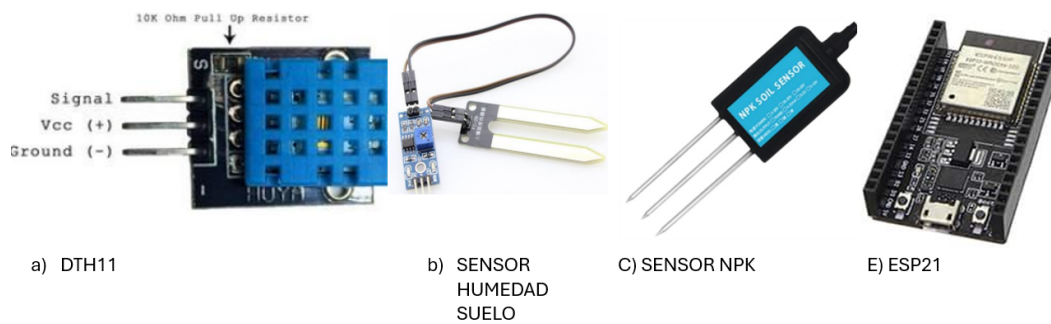


Figura 2: Sensores y dispositivos utilizados en el invernadero. Fuente: Elaboración propia.

METODOLOGÍA

La implementación del sistema de control ambiental con IoT se estructuró en fases secuenciales para asegurar su reproducibilidad en otros invernaderos y su integración con la cadena de suministro agrícola (trazabilidad, planeación de cosecha y logística).

FASE 1. REQUERIMIENTOS Y ALCANCE

Esta fase tiene como objetivo alinear necesidades del productor con variables a monitorear y restricciones operativas. Entradas: Reunión con propietario; dimensiones del invernadero; cultivos; disponibilidad de energía y red; presupuesto. Los pasos a seguir son :

1. Levantar ficha técnica del invernadero (área, número de túneles, materiales, ventilación, orientación).
2. Definir variables críticas: temperatura interna ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa del aire (%), humedad del suelo (%) y (opcional) N-P-K.

3. Establecer requisitos de conectividad (WiFi disponible, calidad de señal, cobertura dentro del túnel).
4. Definir restricciones: presupuesto, reposición de sensores, mantenimiento y personal responsable.
5. Parámetros sugeridos: Cobertura WiFi mínima: > -65 dBm en puntos de medición. Intervalo de muestreo: 60300 s (adecuado a límite de ThingSpeak).

FASE 2. DISEÑO DE ARQUITECTURA (CUATRO CAPAS)

El objetivo de esta fase es definir la arquitectura modular en cuatro capas (Fig. 3) para garantizar escalabilidad.

Procedimiento:

1. **Capa física (invernadero):** ubicar puntos de medición considerando microclimas (entrada, centro, fondo, altura de dosel).
2. **Capa de comunicación:** ESP32 con WiFi; topología estrella (nodos-sensor, nodo concentrador ESP32).
3. **Capa de datos en nube:** ThingSpeak para almacenamiento y visualización.
4. **Capa de acceso/usuario:** paneles Web/móvil para consultas y alertas.
5. Parámetros sugeridos: Altura de sensores de aire: 1.21.5 m. Densidad mínima: 1 punto/100150 m^2 por túnel o > 4 puntos por túnel cuando existan gradientes térmicos marcados.

FASE 3. SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE COMPONENTES

En este paso se tiene que concretar materiales de bajo costo (Bill Of Materials BOM) y resistentes a condiciones del invernadero. Para lo anterior se hace:

1. **Seleccionar sensores:** DHT11 (T/HR ambiental) y sonda de humedad/NPK del suelo (LP68 NPK o equivalente).
2. **Seleccionar microcontrolador:** ESP32 con WiFi integrado.
3. Diseñar/seleccionar carcasa IP (ventilada) con disipación pasiva; prever malla anti-insectos y filtros antipolvo.
4. Incluir fuente de alimentación estabilizada y fusible; considerar banco de energía/UPS sencillo si hay cortes.

5. Parámetros sugeridos: Grado de protección carcasa $> IP54$. Cableado blindado para sondas de suelo > 1 m.

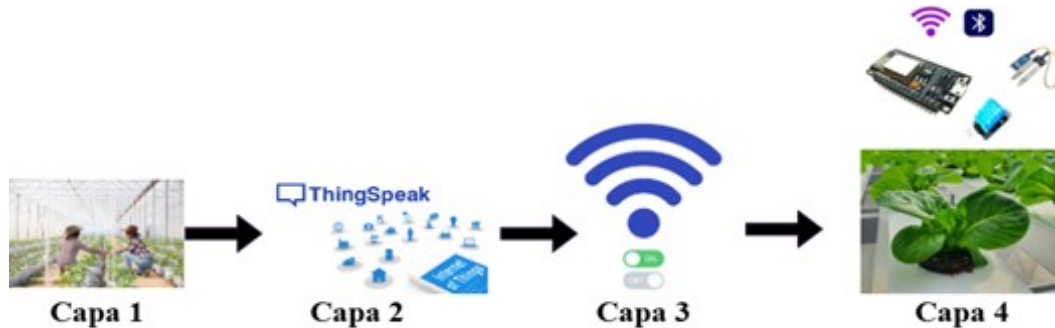


Figura 3: *Modelo de control Ambiental IoT. Fuente Elaboración propia.*

FASE 4. INSTALACIÓN FÍSICA Y MAPEO DE MICROCLIMAS

En esta fase se deben de instalar sensores en posiciones representativas y documentadas.

Procedimiento:

1. Marcar posiciones fijas (ej.: Entrada-izq., Centro-izq., Extremo-der., Fondo-der.) y alturas.
2. Separar sensores de fuentes de calor directas (paredes plásticas, motores, radiación directa).
3. Enterrar sonda de suelo a profundidad de raíz (1020 cm según cultivo); asegurar buen contacto suelo-sonda.
4. Etiquetar cada nodo con código único (T_{nelID} , Posición, Altura).
5. Parámetros: Distancia mínima a paredes laterales: mayor a 0.5 m. Tiempo de estabilización post-instalación: 1015 min antes de primera lectura.

FASE 5. FIRMWARE DEL ESP32 (ADQUISICIÓN Y ENVÍO)

En esta fase se programa la adquisición robusta y envío confiable a la nube.

Procedimiento:

1. Configurar librerías de sensores (DHT) y cliente HTTP.
2. Implementar rutina: lectura validación promedio móvil envío.
3. Manejar reintentos y cola local cuando no haya red (buffer circular en RAM/Flash).

4. Incluir marca de tiempo (RTC/NTP) y campos de identificación (Túnel, Punto, Cultivo).
5. Parámetros: Intervalo de muestreo: 60120 s (ThingSpeak acepta $> 15s$; 60s equilibra detalle/consumo). Promedio móvil: ventana 35 muestras para suavizar ruido.

FASE 6. CONFIGURACIÓN DE LA NUBE (THINGSPEAK)

En esta etapa se tiene que estandarizar el esquema de datos y paneles. Con los siguientes pasos:

- Crear Channel por invernadero (o por túnel si es grande).
- Mapear campos:
 - $field1 = Temp_C$, $field2 = HumRel_{pct}$, $field3 = HumSuelo_{pct}$, $field4 = N_{mgkg}$, $field5 = P_{mgkg}$, $field6 = K_{mgkg}$, $field7 = T_{nel_ID}$, $field8 = P_{unto_ID}$.
- Activar Public/Private View y gráficos (línea/último valor).
- Generar Write API Key (para el ESP32) y Read API Key (para terceros).
- Configurar alertas (React) por umbrales, p. ej.: si $Temp_C > 35^{\circ}C$ durante 10 min, se manda una alerta por correo/Telegram.
- Formato de actualización (HTTP GET).

FASE 7. CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN

En esta fase se tiene que asegurar que las lecturas sean confiables. Los pasos a realizar son:

- Temperatura/Humedad (DHT11): verificación cruzada con termohigrómetro de referencia en 23 puntos/condiciones; ajustar sesgo si es necesario.
- Humedad del suelo: método gravimétrico simple en 3 muestras (peso húmedo/seco) para aproximar % humedad y comparar con sonda.
- NPK (si aplica): verificar con tiras reactivo/lab rápido en una muestra representativa.
- Parámetros:
 - Aceptar desviaciones: $Temp + - 1,0 - 1,5C$; $HR + -5 - 7\%$; Hum. suelo $+ - 5$ puntos.

FASE 8. PRUEBAS POR ETAPAS

Con las pruebas se valida la robustez antes de operación continua. El Procedimiento siguiendo tu historial de pruebas:

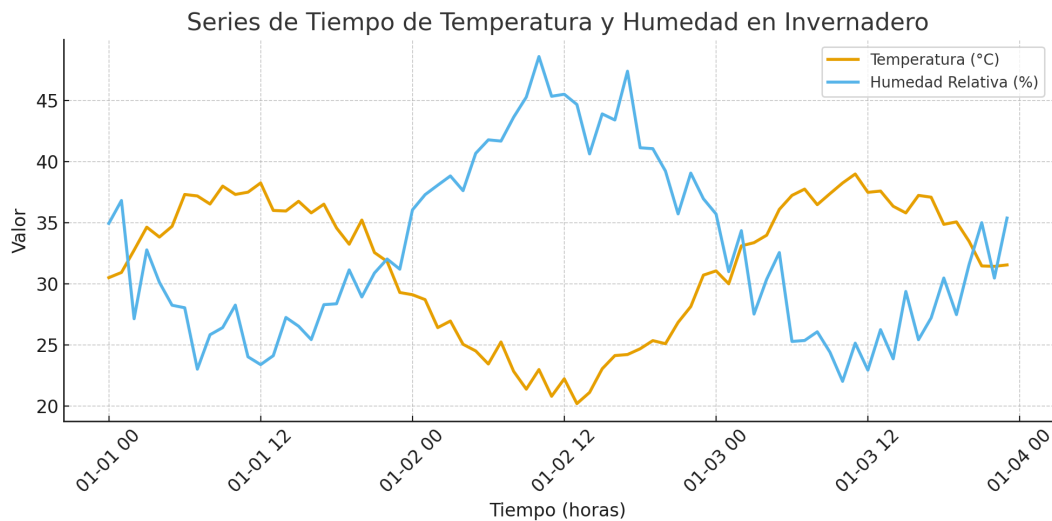


Figura 4: Series de tiempo de temperatura y humedad relativa en el invernadero durante tres días consecutivos.

- Pruebas preliminares: lecturas básicas de T/HR y suelo con DHT11 y sonda; verificar rangos esperados.
- Pruebas con LC-1329 (IR): comparar lecturas de T/HR en tiempo real contra DHT11; evaluar estabilidad térmica del encapsulado.
- Pruebas integrales: ESP32 + DHT11 + LP68 NPK enviando a ThingSpeak; revisar continuidad de datos 4872 h.

RESULTADOS

El sistema propuesto fue evaluado durante un periodo de 15 días en un invernadero ejidal ubicado en Guanajuato, México, con cultivos hortícolas de ciclo corto. Las mediciones se realizaron en intervalos de 60 segundos y se almacenaron en la plataforma ThingSpeak, permitiendo la generación de series de tiempo continuas para temperatura, humedad relativa del aire y humedad del suelo.

SERIES DE TIEMPO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD

En la Figura 4 se muestran los registros de temperatura y humedad relativa captados por el sensor DHT11 durante 72 horas continuas de operación. Se observa que la temperatura varió entre 29,4 °C y 42,5 °C, mientras que la humedad relativa fluctuó entre 24 % y 39 %. Estas oscilaciones corresponden a los ciclos naturales de radiación solar y ventilación del invernadero, confirmando la capacidad del sistema para detectar microclimas internos.

Tabla 1: Mediciones de humedad del suelo en un túnel del invernadero.

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Medición obtenida	211	184	176	131	173	165	129	105	138	116

Tabla 2: Costo de los BOM utilizados

Componente	Cantidad	Especificación	Costo unitario (MXN)	Proveedor
Sensor DHT11	2	Temp. y HR ambiental	50	Steren/Amazon
Sensor NPK	1	Nutrientes y humedad	500	AliExpress
ESP32	1	WiFi integrado, 30 pines	250	Steren/Mouser
Carcasa IP54	1	Plástico ABS, disipador	120	Mercado Libre
Fuente 5V 2A	1	Regulada	90	Electrónica local

MEDICIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO

La Tabla 1 resume los valores de humedad del suelo obtenidos en diez puntos de muestreo del primer túnel, mediante el sensor NPK. Los valores fluctuaron entre 105 y 211 unidades, evidenciando diferencias significativas entre zonas, lo que permite optimizar la aplicación de riego.

COMPARATIVA DE COSTOS

Las Tablas 3 y 2 presentan una comparación entre el prototipo desarrollado y sistemas comerciales de automatización agrícola. El costo total del sistema IoT propuesto fue de aproximadamente 1,200 MXN (65 USD), mientras que soluciones comerciales similares superan los 25,000 MXN (1,350 USD). Esto confirma que el desarrollo es significativamente más accesible para productores ejidales.

VALIDACIÓN CON INSTRUMENTO PATRÓN (LC-1329)

Se realizaron 30 mediciones comparativas entre los sensores DHT11 y el dispositivo LC-1329. La Figura 5 y la Figura 6 muestran las series de temperatura y humedad obtenidas en 24 horas. El DHT11 presentó un error promedio de ± 1.1 °C en temperatura y ± 3.1 % en humedad relativa respecto al LC-1329, dentro de los rangos aceptables para aplicaciones agrícolas.

Se llevaron a cabo tres ciclos de pruebas con los mismos dispositivos, en diferentes días y horarios. En cada ciclo, los resultados mostraron tendencias consistentes, confirmando la reproducibilidad del sistema. La estandarización del intervalo de muestreo (60 s) y el almacenamiento en la nube permiten

Tabla 3: Comparación de costos entre el sistema desarrollado y soluciones comerciales.

Sistema	Funcionalidad	Costo aproximado
Prototipo IoT (ESP32 + DHT11 + NPK + ThingSpeak)	Monitoreo T/HR y suelo, nube	\$1,200 MXN
Sistema comercial básico	Monitoreo T/HR	\$25,000 MXN
Sistema comercial avanzado	Monitoreo + control riego/ventilación	\$40,000 MXN

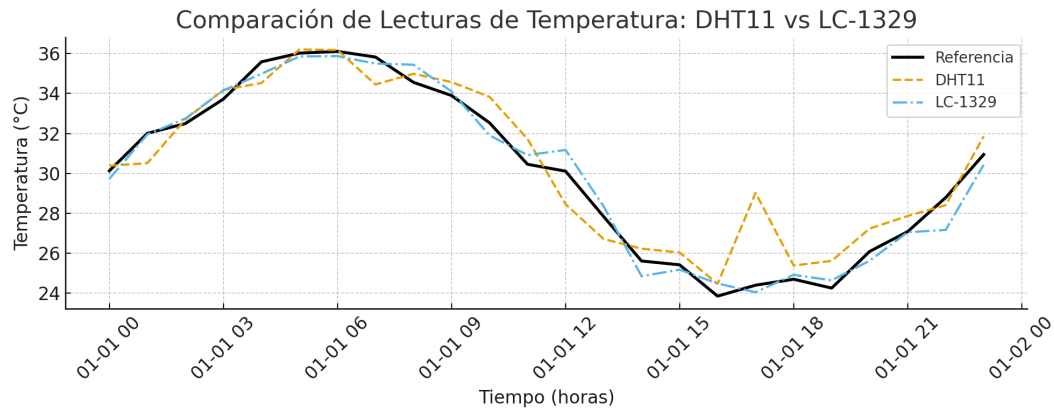


Figura 5: Comparación de lecturas de temperatura: DHT11 vs LC-1329.

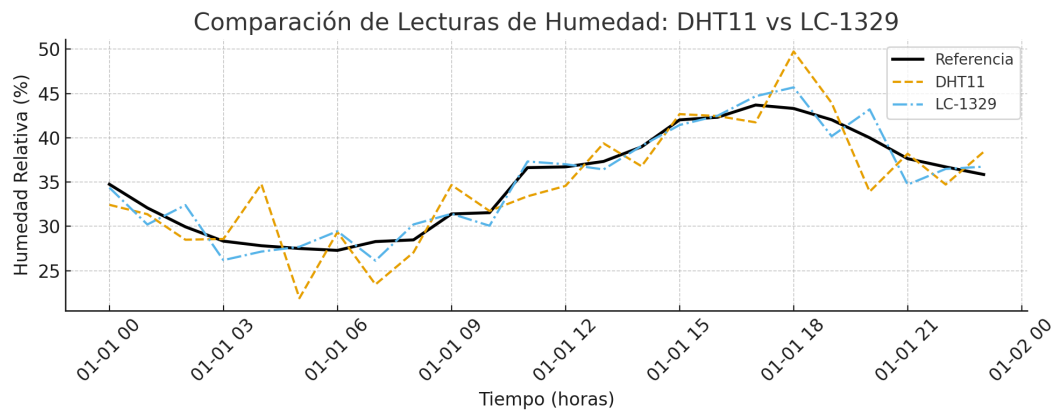


Figura 6: Comparación de lecturas de humedad relativa: DHT11 vs LC-1329.

Tabla 4: Validación del sensor DHT11 frente al dispositivo LC-1329.

Variable	Diferencia promedio (DHT11 vs LC-1329)	Rango aceptable en agricultura
Temperatura (°C)	± 1.1	± 2.0
Humedad relativa (%)	± 3.1	± 5.0

que la metodología pueda ser replicada en otros invernaderos con condiciones similares. El sistema fue probado únicamente en un invernadero debido a restricciones logísticas y de recursos. Sin embargo, el enfoque modular facilita su escalabilidad a múltiples invernaderos con configuraciones similares. En estudios futuros se contempla su validación en invernaderos de mayor superficie y con diferentes cultivos.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que el sistema IoT desarrollado es funcional para el monitoreo básico de temperatura, humedad relativa y humedad del suelo en un invernadero ejidal. No obstante, es importante reconocer que el desempeño estuvo condicionado por las características de los sensores empleados y por las limitaciones propias del entorno experimental. En cuanto a la precisión, los sensores DHT11 presentaron desviaciones promedio de $\pm 1.1^{\circ}\text{C}$ y $\pm 3.1\%$ en comparación con el dispositivo LC-1329. Aunque estos valores se encuentran dentro de márgenes aceptables para agricultura, no alcanzan la exactitud requerida en aplicaciones de investigación avanzada. Además, la variabilidad de las lecturas bajo condiciones de alta radiación solar y cambios bruscos de humedad resalta la necesidad de considerar técnicas de calibración periódica y, en un futuro, sensores con mayor robustez.

Otro aspecto relevante fue la durabilidad de los componentes electrónicos. Durante las pruebas se detectó sensibilidad de los sensores a las altas temperaturas internas del invernadero, lo que sugiere la necesidad de mejorar el diseño de las carcasas protectoras y contemplar sistemas de ventilación pasiva. Estas limitaciones evidencian que, si bien los dispositivos de bajo costo son una alternativa viable para pequeños productores, requieren mantenimiento preventivo y reposición frecuente para asegurar continuidad de datos. En cuanto a la conectividad, el uso exclusivo de WiFi resultó adecuado para el entorno de prueba, pero puede limitar la escalabilidad en invernaderos rurales sin infraestructura de red estable. En este sentido, tecnologías de comunicación alternativas como LoRa, ZigBee o NB-IoT constituyen líneas de mejora identificadas directamente a partir de la experiencia experimental. Desde la perspectiva de la cadena de suministro agrícola, los datos obtenidos permitieron identificar microclimas y variaciones de humedad que influyen en la calidad del cultivo y, por ende, en la planeación de cosecha y logística. Sin embargo, para que esta información pueda integrarse de manera efectiva en decisiones de mercado, sería necesario incorporar más variables críticas como la concentración de CO_2 , la radiación fotosintéticamente activa o indicadores de plagas. Esto permitiría que el sistema trascienda el monitoreo básico y se convierta en una herramienta de apoyo para la trazabilidad y certificación de calidad en la cadena de valor.

El trabajo futuro se orienta, por tanto, a superar las limitaciones encontradas durante las pruebas experimentales. Resulta fundamental explorar la integración de sensores más precisos y resistentes, así como el rediseño de carcasas que soporten mejor las condiciones ambientales del invernadero. Igualmente, es necesario evaluar tecnologías de comunicación que garanticen la transmisión continua de datos en entornos rurales y avanzar hacia pruebas comparativas en distintos tipos de invernaderos y cultivos para validar

la replicabilidad del sistema. Solo a partir de estos ajustes podrá considerarse una integración más amplia con plataformas de gestión agrícola y logística que fortalezcan la trazabilidad y la eficiencia de la cadena de suministro. En conclusión, este trabajo demuestra la factibilidad de utilizar dispositivos IoT de bajo costo en invernaderos ejidales, con el beneficio de acercar tecnologías digitales a pequeños productores. Sin embargo, el estudio también deja claro que la adopción de estas soluciones exige un reconocimiento de sus limitaciones y un plan de mejora continua que incremente su confiabilidad y escalabilidad. De esta manera, se podrán sentar bases más sólidas para su integración en la agricultura de precisión y en la gestión de cadenas de suministro agrícolas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) y al Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras (SNII) en conjunto con el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón División de ingeniería en Sistemas Automotrices por su tiempo y apoyo para el desarrollo de esta investigación.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORES Y COLABORADORES

Erick Padilla-Macías: Conceptualización, Metodología, Software y Hardware. **Lucero Ortiz-Aguilar:** Conceptualización, Redacción - Preparación del borrador original, Revisión y Edición. **Julio Funes-Tapia:** Investigación **Luis Xoca-Orozco:** Revisión y Edición.

REFERENCIAS

- [1] M. Gómez and A. D. V. Villicaña. El sector agropecuario en México ante el cambio climático. *Its'i Echeri Revista de Divulgación de Estudios Económico Agroalimentarios y del Desarrollo Rural*, 2(4):17–25, 2024.
- [2] J. A. R. Aguilar, Z. S. H. Veleros et al. Impacto Económico y Ambiental de las Energías Renovables y No Renovables en México. *Boletín Científico de las Ciencias Económico Administrativas del ICEA*, 11(22):17–27, 2023.
- [3] N. Rivero Rodríguez. *Mantenimiento y manejo de invernaderos: UF0016*. IC Editorial, 2018. ISBN: 9788491982234. 207 pp. Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/bibliotecpurisima/titulos/59192>.
- [4] M. Fuster Roig. *Producción de plantas y tepes en viveros*. Bubok Publishing S.L., 2018. ISBN: 9788468655826. 146 pp. Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/bibliotecpurisima/titulos/51376>.
- [5] A. Moreno Vega. *Manejo y mantenimiento de invernaderos*. Ediciones Mundi-Prensa, 2017.

-
- [6] E. R. López Ordoñez. Diseño de un sistema de supervisión y control de parámetros de un invernadero automatizado. Tesis de doctorado, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2020.
 - [7] A. A. Guijarro-Rodríguez, L. J. C. Torres, D. K. Preciado-Maila, and B. N. Z. Manzur. Sistema de riego automatizado con Arduino. *Sistema*, 39(37):27, 2018.
 - [8] E. Tiscornia and A. De Felipe. Domótica: La vivienda inteligente. *Consultado el*, 15, 2015.
 - [9] R. Madhumathi, T. Arumuganathan, and R. Shruthi. Soil NPK and moisture analysis using wireless sensor networks. In *2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, pages 1–6. IEEE, 2020.
 - [10] F. J. Ferrández-Pastor, S. Alcañiz-Lucas, J. M. García-Chamizo, and M. Platero-Horcajadas. Smart environments design on industrial automated greenhouses. In *Proceedings*, 31(1):36. MDPI, 2019.
 - [11] N. Li, Y. Xiao, L. Shen, Z. Xu, B. Li, C. Yin et al. Smart agriculture with an automated IoT-based greenhouse system for local communities. *Advances in Internet of Things*, 9(02):15, 2019.
 - [12] T. B. Dwinugroho, Y. T. Hapsari et al. Greenhouse automation: Smart watering system for plants in greenhouse using programmable logic control (PLC). In *Journal of Physics: Conference Series*, 1823(1):012014. IOP Publishing, 2021.